

Ein Beitrag zur Energieeffizienzbewertung von wässrigen Bauteilreinigungsanlagen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Felix Junge

aus Wolgast

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. Sc. Tatiana Gambaryan-Roisman
Tag der Einreichung:	08. Januar 2019
Tag der mündlichen Prüfung:	23. April 2019

Darmstadt 2018

D17

Junge, Felix: Ein Beitrag zur Energieeffizienzbewertung von wässrigen Bauteilreinigungsanlagen
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2019
Tag der mündlichen Prüfung: 23.04.2019

Veröffentlicht unter UrhG

„Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den in ihr ausdrücklich genannten Hilfen, selbständig verfasst habe.“

Darmstadt, den _____

Felix Junge

Der Fehler ist, sich deshalb wissend zu fühlen statt beschränkt.
Wer verdrängt, dass es die anderen sind, die etwas können und etwas erleben,
ist verschlossen da, wo Aufgeschlossenheit angebracht wäre.

H. Sußebach

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen an der Technischen Universität Darmstadt. Zu einem überwiegenden Teil beruhen die Resultate auf den Arbeiten des interdisziplinären Forschungsprojektes ETA-Fabrik (Energieeffizienz, Technologie- und Anwendungszentrum) in der Gruppe Umweltgerechte Produktion.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele für seine fortwährende Unterstützung bei der Umsetzung meiner Forschungsarbeit. Hierbei empfand ich vor allem Rückhalt, durch das in mich gesetzte Vertrauen, dass sich in den vielen verantwortungsvollen Aufgaben zeigte. Dadurch konnte ich in einer einzigartigen Forschungsumgebung ETA-Fabrik alle Freiheiten zur Umsetzung meiner Ideen nutzen.

Des Weiteren möchte ich Frau Prof. Dr. Sc. Tatiana Gambaryan-Roisman danken, dass Sie das Co-Referat und Mitberichterstattung übernommen hat.

Ebenfalls möchte ich an dieser Stelle die gesamte Forschungsgruppe der Umweltgerechten Produktion nennen. Ohne Eure Mithilfe, fachlichen Gesprächen, Rat und vor allem die sehr kreative und freundschaftliche Atmosphäre wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen. Danken möchte ich Martin für die tolle Bürozeit, seine unermüdliche Arbeit als Kopf unseres gemeinsamen Forschungsprojekts und natürlich seine unerschöpfliche Quelle an neuen Ideen. Philipp gilt insbesondere mein Dank für die vielen Tipps und Unterstützung in allen Fragen der Messtechnik und Elektronik und die vielen bildhaften Impressionen zur Veranschaulichung des komplexen wissenschaftlichen Alltags – aber vor allem auch für seinen Input bei der Korrektur dieser Arbeit. Niklas möchte für seinen fachlichen Rat, Umsetzung der MSR-Technik danken und natürlich seinen unermüdlichen Antrieb der kontinuierlichen Verbesserung. Vielen Dank auch an Mark für seine Unterstützung bei allen Versuchsaufbauten und qualitativen Rat, Christoph für die lange gemeinsame Arbeit am Ofen und die schöne Zeit in Japan, Nina für ihre Unterstützung bei der thermischen Versorgung meiner Versuchsmaschinen, Dominik und Jessica für die schöne und humorvolle Bürozeit. Daneben Dank ans gesamte restliche ETA-Team: Max, Daniel, Thomas, Lars, Johannes, Thomas, Daniel. Danke an Christian und Sebastian für ihr Mitwirken bei der Entwicklung der ETA-Fabrik. Und natürlich gilt mein besonderer Dank Tine für die Übernahme und Weiterentwicklung des gemeinsamen Forschungsthemas, die tolle gemeinsame Bürozeit, die konstruktiven Ratschläge und sehr wertvollen Korrekturen dieser Arbeit.

Ohne den Rückhalt und langandauernde Unterstützung meinen Eltern Hubert und Gudrun und meiner Schwester Franziska wäre diese Arbeit ebenso wenig möglich gewesen, wofür ich ihr von Herzen danken möchte.

Abschließend gilt mein größter Dank meiner zukünftigen Ehefrau, Taniya, und der Kraft, die sie mir in all der Zeit gegeben hat. Nur durch deine Unterstützung konnte diese Arbeit so gelingen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens in Theorie und Praxis.....	4
2.1	Industrielle Bauteilreinigung im Umfeld der metallverarbeitenden Produktion.	4
2.1.1	Verfahrensauswahl.....	5
2.1.2	Anlagentechnik	7
2.1.3	Richtlinien und Normen.....	8
2.1.4	Wissenschaftliche Aufarbeitung im Bereich der industriellen Bauteilreinigung	10
2.2	Energieeffizienz in der Industrie	11
2.2.1	Energieeffizienz von Produktionsanlagen.....	13
2.2.2	Energieeffizienz im Bereich der Oberflächentechnik und Bauteilreinigung....	15
2.2.3	Richtlinien und Normen zur Energieeffizienz im produktionstechnisches Kontext.....	19
2.3	Zusammenfassung	21
3	Bewertungssystematik für die Energieeffizienz von Produktionsanlagen	22
3.1	Forschungskonzeption.....	22
3.1.1	Ableitung von Forschungszielen und Anforderung an die Bewertungssystematik.....	22
3.1.2	Inhaltliche Anforderungen	23
3.1.3	Formale Anforderungen.....	24
3.2	Methodische Unterscheidungsmerkmale von Energieeffizienzbewertungen ..	25
3.2.1	Definition des Untersuchungsgegenstands.....	27
3.2.2	Festlegung der Aussageart.....	27
3.2.3	Definition des Bewertungsraumes	28
3.3	Minimum Value Calculation Methode	30
3.3.1	Energetisch-Physikalisches Minimum der Bauteilreinigung	32
3.3.2	Energetisch-Technologisches Minimum	33
3.3.3	Energetisch-Reales Minimum.....	34
3.3.4	Gemessener Energiebedarf	34
3.4	Anwendergruppen der Energieeffizienzbewertungen	36

3.4.1	Nutzer der Reinigungsanlagen.....	36
3.4.2	Hersteller der Reinigungsanlagen	37
3.4.3	Anwendungen für Energieeffizienzbewertungen	38
3.5	Teilzusammenfassung.....	39
4	Ermittlung der Bindungsenergien von Verunreinigungen	42
4.1	Arten der Verunreinigungen	42
4.1.1	Partikuläre Verunreinigungen	44
4.1.2	Filmische Verunreinigungen	45
4.2	Modell des Bindungsmechanismus von Verunreinigungen.....	47
4.2.1	Oberflächenwechselwirkungen.....	47
4.2.2	Adhäsionskraftmodelle	52
4.2.3	Grenzflächenspannung fluider Phasen an festen Oberflächen	58
4.2.4	Solid-Liquid-Solid Materialpaarungen	59
4.3	Technische Sauberkeit.....	61
4.3.1	Sauberkeitsspezifikation.....	61
4.3.2	Partikelgrößenverteilung und Partikelhäufigkeitsklassen	62
4.3.3	Restschmutzanalyse	64
4.3.4	Oberflächenspannung.....	65
4.3.5	Mikrostruktur von Bauteilen	66
4.4	Partikelanalyse	67
4.4.1	Geometrische Formanalyse	67
4.4.2	Geometrische Oberflächenanalyse.....	71
4.4.3	Statistische Auswertung der Partikeleigenschaften	73
4.5	Bindungsenergie von Verunreinigungen auf zerspannten Stahlbauteilen	74
5	Lösungsmechanismen zum Entfernen von Verunreinigungen und Bereitstellung der benötigten Energieform	80
5.1	Lösungsmechanismen durch kinetische Energie von Fluidströmungen	81
5.1.1	Hydrodynamische Kräfte und Momente auf Partikel in einer Strömung	81
5.1.2	Einfluss des Strömungsregimes durch Berechnung von Partikel-Reynolds-Zahlen.....	85
5.1.3	Geschwindigkeitsprofil der ebenen Plattenströmung	87

5.2	Transport- und Grenzflächenphänomene mizellarer flüssig/flüssig-Systeme....	88
5.2.1	Stofftransport in Wasser-Öl-Tensid-Systemen.....	89
5.2.2	Temperatureinfluss auf die Transport- und Grenzflächenphänomene	92
5.3	Erzeugung kritischer Fluidgeschwindigkeit für Partikeltransporte.....	94
5.3.1	Impulsübertragung von axialsymmetrischen Spritzstrahlen auf eine ebene Wand.....	94
5.3.2	Freistrahlen.....	98
5.3.3	Einfluss der Bauteilgeometrie auf die fluide Impulsübertragung.....	101
5.4	Berechnung der benötigten kinetische Energie und Ermittlung der Mindestprozessdauer.....	102
5.4.1	Fluidgeschwindigkeiten auf dem Bauteil.....	102
5.4.2	Fluidgeschwindigkeiten im Freistrahл	105
5.4.3	Mindestprozessdauer für Lösungsvorgänge	107
5.4.4	Erforderliche Reinigungstemperatur	109
6	Energiebedarfsanalyse von Reinigungsanlagen im Betrieb	110
6.1	Vom idealen zum realen Reinigungsvorgang.....	111
6.1.1	Erzeugung der benötigten Fluidvolumenströme	111
6.1.2	Erzeugung der benötigten Temperaturen	113
6.1.3	Trocknungseinfluss	114
6.1.4	Aufbereitung der Reinigungsmedien	115
6.1.5	Energiebilanzierung eines realen Reinigungsvorgangs	116
6.2	Energiebilanzierung nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik	117
6.2.1	Wärmetransport.....	120
6.2.2	Enthalpieströme	126
6.2.3	Energiebilanz der Reinigungsmaschine	128
6.2.4	Energiebilanz der Reinigungskammer.....	129
6.3	Aufbau und Strukturanalyse einer wässrigen Bauteilreinigungsanlage	130
6.3.1	Verbrauchs- und Nutzungsgruppen orientierte Maschinenstrukturanalyse..	131
6.3.2	Nutzungsprofile der Verbrauchsgruppen in einer Reinigungsmaschine	134
6.4	Energiebilanz unter Einbeziehung von Einflussfaktoren	135
7	Energieeffizienzanalyse einer wässrigen Bauteilreinigung an einem Beispielverfahren	138

7.1	Wässrige Bauteilreinigung innerhalb einer Fertigungskette einer zerspanenden Produktion	138
7.1.1	Bauteilbeschreibung	139
7.1.2	Erforderliche technische Sauberkeit	141
7.1.3	Technische Beschreibung der Versuchsanlage	143
7.2	Ermittlung des Energiebedarfs der Reinigungsmaschine in der laufenden Produktion	144
7.2.1	Energiebedarf eines realen Reinigungsvorgangs	144
7.2.2	Ermittlung des Wärmebedarfs	148
7.2.3	Parametrierung der Umgebungstemperatur als variable Einflussgröße	150
7.2.4	Energieeffizienz der Reinigungsanlage in der Produktion	153
7.3	Ableitung des energetisch-realen Minimums	154
7.3.1	Analyse und Bewertung der Energieflüsse in der Reinigungsmaschine	154
7.3.2	Energieeffizienz der Reinigungsmaschine - EEV_R	160
7.4	Analyse des energetisch-technischen Minimums	161
7.4.1	Kinetische Energie des Reinigungsmediums auf dem Bauteil	161
7.4.2	Energieeffizienz der Technologie Spritzreinigung - EEV_R	164
7.5	Berechnung des energetisch-physikalischen Minimums als Nutzen der Reinigung	164
7.5.1	Bindungsenergien der Partikel und filmischen Verunreinigung	164
7.5.2	Physikalische Energieeffizienz der Technologie Spritzreinigung - EEV_P	167
7.6	Bewertung der ermittelten Energieeffizienzen	167
7.6.1	Weitere Kennzahlen der Energieeffizienz	168
7.6.2	Parameteranalyse der Energieeffizienz	169
7.6.3	Energieeffizienz für Anwender von Reinigungsanlagen	170
7.6.4	Energieeffizienz für Hersteller von Reinigungsanlagen	171
8	Schlussbetrachtung und Ausblick	173
A	Literaturverzeichnis	176
B	Abbildungsverzeichnis	186
C	Tabellenverzeichnis	191
D	Anhang	194

D.1 Datenblatt Reinigungsanlage JAVA	194
D.2 Ablauf zur Berechnung des Wärmetransports	196
D.2.1 Wärmeleitung	196
D.2.2 Evaluierung des ERM: Wärmeleitung	196
D.2.3 Konvektion	197
D.2.4 Evaluierung des ERM: Konvektion.....	198
D.2.5 Wärmestrahlung	201
D.2.6 Evaluierung des ERM: Wärmestrahlung	201
D.3 Messstellenplan zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen.....	205
D.4 Berechnungsschemata zur Ermittlung der Enthalpien der Luftströme	206
D.4.1 Feuchte Luft	206
D.4.2 Evaluierung des ERM: Enthalpieströme.....	207
D.5 Partikelauswertung.....	209
D.6 Analyse der filmischen Verunreinigung	212
D.7 Pumpenkennfeld.....	213
D.8 Systemidentifikationstool in der KNIME Analytics Platform.....	214

Nomenklatur

Abkürzungsverzeichnis

2/3 D	2/3-Dimensional
Abb.	Abbildung
Bez.	bezüglich
CCC	Component Cleanliness Code
cmc	critical micelle concentration
CRISP-DM	Cross Industry Standard Process for Data Mining
CT	Computertomographie
DDAB	Didodecyldimethylammoniumbromide
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBM	Gemessener Energiebedarf
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EEV	Energy efficiency value
EMSR	Elektrische Messung, Steuerung und Regelung
EnB	Energetische Ausgangsbasis
Engl.	englisch
EnMS	Energiemanagementsystem
EnPI	Energieleistungskennzahl
EPM	Energetisch-Physikalisches Minimum
ERM	Energetisch-Reales Minimum
ETA	Energieeffizienz, Technologie- und Anwendungszentrum an der technischen Universität in Darmstadt
Etc.	et cetera
ETM	Energetisch-Technologisches Minimum
f.	folgend
ff.	folgende
Ggf.	gegebenenfalls
HC	Kohlenwasserstoff
HS	Hauptsatz
i.O.	In Ordnung
IBN	Inbetriebnahme
IR	Infrarotspektroskopie
ISO	International Organization for Standardization
KNIME	Konstanz Information Miner
KSS	Kühlschmierstoff
li.	links
LIPS	Laserinduzierte Plasmaspektroskopie
Max.	maximal

MSR-Technik	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
MT	Medientank
MVC	Minimum Value Calculation
PET	Polyethylenterephthalat
PID	proportional–integral–derivative
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
R.	Reiniger
Raman	Raman-Spektroskopie
Re.	rechts
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
REM	Rasterelektronenmikroskop
RK	Reinigungskammer
RM	Reinigungsmaschine
RMSE	Root Mean Squared Error
s.	siehe
Tab.	Tabelle
Temp.	Temperatur
u.v.m.	Und viele mehr
u.v.w.m.	Und viele weitere mehr
UL	Umgebungsluft
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VDI	Verband deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
Vgl.	vergleiche
Vol.	Volumen

Formelverzeichnis

A	Charakterisierende Potenzialstärke der repulsiven Kräfte
A	Änderungsarbeit des Phasenvolumens
A	Fläche
A	Auslastung
a	Teilchenradius
A_D	Düsenquerschnittsfläche
A_H	Hamaker-Konstante
a_0	Kontaktfläche zweier Körper
A_{ges}	(medienberührte) Fläche des Systems
$A_{Teil\ i}$	(medienberührte) Fläche des Bauteils i
B	Charakterisierende Potenzialstärke der attraktiven Kräfte
C	Konstante
C_L	London-Konstante
c_w	Widerstandsbeiwert
$c_{p\ L}$	Wärmekapazität trockner Luft
c_S	Konzentration der Substanz S
d	Abstand zwischen den Teilchen bzw. Molekülen
d	Abstand zwischen Kugel und Ebene
dQ_{zu}	Zugeführte Hilfsenergie
d_p	Partikeldurchmesser
def	Definiert als
D_{AB}	Diffusionskoeffizient
E	Energie
E	Äußeres elektrisches Feld
E^*	Ausdruck für das mechanische Verformungsverhalten zweier Stoffe
E_M	An Masse gebundene Energie
E_i	Young-Modul
$E_{M\ L}$	Bindungsenergie
$E_{e\ j}$	Energietherme der Wandlungsverluste des Equipments
$E_{m\ i}$	Energietherme der Input/Output-Spezifikationen der Materialien
$E_{p\ i}$	Energietherme der Peripherievorgänge
$E_{t\ i}$	Energietherme der technologischen und prozessualen Spezifikationen
EEV_P	physikalische Energieeffizienz
EEV_R	Energieeffizienz der Produktionsanlage
EEV_T	technologische Energieeffizienz
E_{therm}	Thermische Energie
EPM	Energetisch-Physikalisches Minimum
ERM	Energetisch-Reales Minimum
ERM	Gemessener Energiebedarf
ETM	Energetisch-Technologisches Minimum

\dot{e}	Energiestromdichte
F	Kraft
$F_{ad\ cap}$	Adhäsionskraft durch die Kapillare
$F_{ad\ Rab}$	adhäsiven Gesamtkraft nach Rabinovich
F_{DMT}	Adhäsionskräfte nach DMT-Theorie
F_{JKR}	Adhäsionskräfte nach JKR-Theorie
F_N	Normalkraft
F_W	Van-der-Waals-Kraft
F_{el}	Elektrostatische Kraft
\vec{f}	Spezifische Volumenkraft
\vec{F}_G	Gewichtskraft
\vec{F}_{Saff}	Saffmann-Kraft
\vec{F}_W	Widerstandskraft
\vec{F}_i	Vektorielle Kräfte
G	Gibbs-Enthalpie
Gr	Grashof-Zahl
GW_{ges}	Sauberkeitsgrenzwert des Gesamtsystems
$GW_{Teil\ i}$	Gesamtgrenzwert des Bauteils i
\vec{g}	Schwerebeschleunigung
h	Planck'sches Wirkungsquantum
h	Fluidhöhe
h	Spezifische Enthalpie
H_0	Minimalabstand zwischen den Oberflächen (intermolekularer Abstand nach Lennard-Jones-Potenzialfunktion)
h_L	Höhe der Filmschicht
k_B	Boltzmannkonstante
k_E	Eötvös-Konstante
k_{New}	Korrekturfaktor im Newton'schen Strömungsbereich
L	Charakteristische Länge
l	Abstand der Düsenöffnung zu Pralloberfläche
M_S	Molmasse
m_L	Restschmutzmenge
m_p	Partikelmasse
N	Anzahl konvexer Konturen
Nu	Nußelt-Zahl
N_A	Avogadro-Konstante
n_i	Stoffmenge der Phase i
\dot{n}_A	Stofftransport
O	Oberfläche
P	Leistung
Pr	Prandtl-Zahl
P_{hy}	hydraulische Leistung

Q	Wärme
Q_R	Rückprallvolumenstrom
Q_S	Strahlvolumenstrom
q_i	Elektrische Ladung
\dot{Q}_K	Wärmetransport durch Konvektion
\dot{Q}_S	Wärmestrahlungsstrom
\dot{Q}_{WL}	Wärmestrom durch Wärmeleitung
\dot{q}	Wärmestromdichte
p	Druck
p	Rundheit
R	Kugelradius
R	Partikelradius
R	Radius des größtmöglichen Innenkreises
R	Universelle Gaskonstante
r	Abstand zwischen den Punktladungen
r	Radius der Kontaktraugigkeit (Asperiten)
Re	Reynolds-Zahl
R_Z	Gemittelte Rautiefe
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert
R_{max}	Maximale Rautiefe
R^*	Reduzierter Kugelradius
r_2	Radius der Kontaktraugigkeit (Asperiten)
r_i	Krümmungsradien
r_i	Konturkreisradien
rms_c	Rauheit des Partikels
rms_{ges}	Gesamtrauheit
rms_i	Mittlere Quadratische Asperitenhöhe
rms_p	Rauheit des Bauteils
S	Systementropie
s	Gleichgewichtsabstand
T	Temperatur
t	Prozessdauer
T_C	Kritische Temperatur
T_θ	Stoffabhängige, konstante Temperatur
U	Wechselwirkungsenergie zwischen induzierten Dipolen
U	Innere Energie
u	Spezifische innere Energie
U_{Disp}	Dispersionsenergie der Moleküle
V	Systemvolumen
v_F	Fluidgeschwindigkeit
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektorfeld
W	Technische Arbeit

W_A	Adhäsionsarbeit
We_S	Weber-Zahl
x	Absolute Feuchte
X_L	Eigenschaftsvariable der fluiden Verunreinigungen
X_P	Eigenschaftsvariable der partikulären Verunreinigungen
$X_{P\ M}$	Materialparameter der Partikel
$X_{P\ S}$	Gestaltvariable der Partikel
X_i	Bauteilspezifische Gewichtungsfaktoren
$X_{a,z}$	Durchmesser eines Kreises, der die Teilchenprojektion umschließt
$X_{p,s}$	Durchmesser des projektionsflächengleichen Kreises bei stabiler Teilchenlage
$y_{i\ max}$	maximalen Asperitenhöhen
z	Niveaukoordinate des Systems
α	Polarisierbarkeit
α	Wärmeübergangskoeffizient
α_{konv}	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
β	Wärmeausdehnungskoeffizient
Γ	Grenzflächenüberschuss
γ_{LG}	Grenzflächenspannung zwischen flüssiger und gasförmiger Phase
γ_{SG}	Grenzflächenspannung zwischen fester und gasförmiger Phase
γ_{SL}	Grenzflächenspannung zwischen fester und flüssiger Phase
ΔCCC	Änderung der Partikelkonzentration
$\Delta\gamma$	freie Oberflächenenergie
Δh_V	Verdampfungsenthalpie des Dampfs
ΔP	Differenzdruck zwischen dem Druck innerhalb und außerhalb einer Fluidphase
$\Delta p_{Dü}$	Differenzdruck
δ	Grenzschichtdicke
ε	Tiefe der Potenzialmulde im Gleichgewichtszustand
ε	Emissionszahl
ϵ	dielektrische Konstante des jeweiligen umgebenden Mediums
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
η	Dynamische Viskosität
η_{hy}	Hydraulischer Pumpenwirkungsgrad
η_{therm}	Wirkungsgrad der thermischen Wärmezufuhr
θ	Kontaktwinkel
ϑ_i	Temperaturen an den Wandflächen
λ	Wärmeleitfähigkeit
λ_i	Abstände der Asperiten der jeweiligen Rauheitsskalen
μ	Erwartungswert der Asperitenradien und -höhen
μ_T	Tabor-Faktor
μ_i	Chemisches Potenzial der Phase
μ_{ind}	Induziertes Dipolmoment

ν	Grenzfrequenz der Atomwellenfunktion
ν	Kinematische Viskosität
ν_i	Poissonzahl
ξ	Abweichung der Asperitenhöhe vom Erwartungswert
π	Kreiszahl
ρ	Fluidichte
ρ_i	Atomdichte pro Volumeneinheit
ρ_m	Stoffdichte
σ	Standardabweichung der Asperitenradien und -höhen
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
φ_i	Sichtfaktor
Φ_{NV}	Verteilungsfunktion der Asperitenradien
ϕ_{NV}	Dichtefunktion der Asperitenradien
Ψ_{Sp}	Sphärizität

\mathcal{O}	Landau-Operator
$\vec{\nabla}p$	Druckgradient

Indizes

B	Bauteil
G	gas
i	Zählvariable
j	Zählvariable
L	liquid
m	Materialien
m	Zählvariable
max	maximal
min	minimal
n	Zählvariable
S	solid
P	Physikalisch
R	Real
T	Technologisch

1 Einleitung

Nicht erst seit den in jüngster Zeit auf globaler politischer Ebene getroffenen Vereinbarungen zur Eindämmung des Klimawandels¹ rückt für Wirtschaftsunternehmen das Thema Nachhaltigkeit immer stärker in den Fokus ihres Handelns. Eine wesentliche Strategie zur Umsetzung nachhaltiger Wirtschaft ist der schonende Umgang mit der Ressource Energie. Dazu hat sich die Bundesregierung Deutschlands eine 10-Punkte-Agenda zur Erreichung der Energiewende auferlegt.² Damit wurden Maßnahmen gesetzlich verordnet, die in allen Endenergiesektoren³ unter anderem zu einer effizienten Energienutzung, wachsenden Nutzung von erneuerbaren Energien und einem geführten Monitoring des energetischen Verhaltens führen sollen. Diese gesellschaftlich akzeptierten Änderungen beeinflussten durch steigende Kosten der Energie in großem Maße auch die Handlungen der Industrie.

So ist der Strompreis für die Industrie für einen Vergleichszeitraum von 16 Jahren um etwa 150 % gestiegen, wie das Diagramm der Abb. 1-1 zeigt.

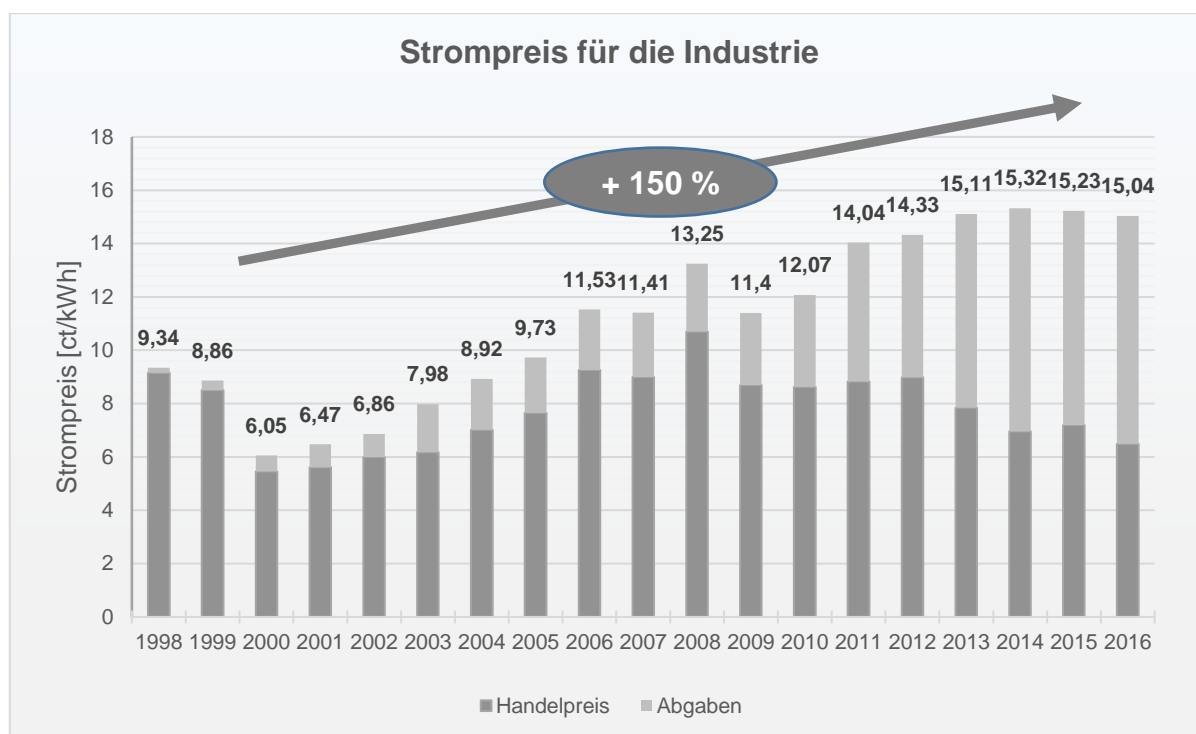


Abb. 1-1: Strompreisentwicklung in Deutschland für die Industrie; bei einem Jahresbedarf zwischen 0,16 - 20 GWh⁴

Diese Veränderung im Bereich der Energieversorgung hat zur Folge, dass die Industrieunternehmen sich zunehmend mit der Senkung ihres Energiebedarfs bzw. der Reduzierung ihrer Energiekosten auseinander setzen müssen.

¹ Vgl. United Nations Framework Convention on Climate Change 2015.

² Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016.

³ Dazu zählen die Industrie, Dienstleistungen und Handel, Gebäude und Verkehr.

⁴ Vgl. BDEW 2014.

Die Auseinandersetzung mit den energetischen Prozessen und vor allem hinsichtlich möglicher Optimierungsmaßnahmen beginnt mit einer Analyse des derzeitigen Ist-Stands.⁵ Nur aus dieser Kenntnislage heraus können Ableitungen getroffen werden, die zu einem energieoptimierten Verhalten führen. Die erste Zielstellung zu einem verbesserten energetischen Verhaltens ist dabei immer in der *Maxime efficiency first* zu suchen.⁶

Vergleicht man den Kenntnisstand in den einzelnen Industriezweigen und Fertigungsverfahren zur Energie, so erkennt man ein deutliches Defizit im Bereich der Oberflächenbehandlung und hierbei insbesondere der Bauteilreinigung.⁷ In der Abb. 1-2 sind verschiedene Fertigungsverfahren hinsichtlich ihres spezifischen Energieaufwands aufgeführt.

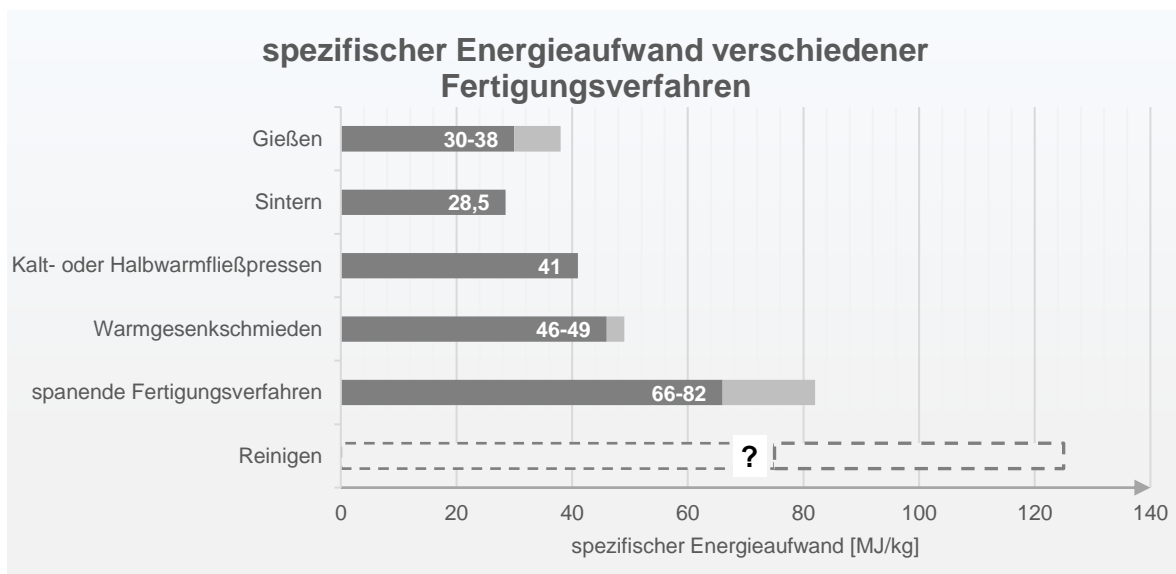


Abb. 1-2: Spezifischer Energieaufwand verschiedener Fertigungsverfahren⁸

Zu den Fertigungsverfahren der Bauteilreinigung fehlen solche Untersuchungen hingegen gänzlich, obwohl es sich um sehr energieintensive Prozesse handelt.⁹ Die Gründe hierfür sind zum einen in der für lange Zeit gültigen Betrachtungsweise der Bauteilreinigung als nicht wertschöpfender Prozess und zum anderen in der Komplexität der Einflussfaktoren, die für eine umfassende energetische Analyse der Bauteilreinigung erforderlich sind.

Hierzu zählen die Domänen der Grenzflächenchemie, der Kontaktmechanik, der Strömungsphysik und der Thermodynamik, die alle bis zu einem Detailgrad verstanden und berücksichtigt werden müssen.

Untersuchungen haben gezeigt, dass enorme Einsparpotenziale des Energiebedarfs im Bereich der Bauteilreinigung zu heben sind.¹⁰ Jedoch fällt die Übertragbarkeit auf andere Verfahren und Anlagen zumeist sehr schwer.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine grundlegenden Analyse der energetischen Prozesse und Vorgänge der wässrigen Bauteilreinigung und –Anlagen durchgeführt. Anhand

⁵ S. ISO 50001.

⁶ Vgl. Hesselbach 2012, S. 287.

⁷ Vgl. Yoon et al. 2015, 876ff.

⁸ S. Blesl und Kessler 2017, S. 12.

⁹ S. Hopf 2015, S. 160.

¹⁰ S. Abele et al. 2018.

der ermittelten Ergebnisse kann eine systematische Bewertung der Energieeffizienz der wässrigen Bauteilreinigung für die Technologie der Verfahren selbst, als auch die Anlagenkonfiguration und deren Betrieb in einer Produktionsumgebung erfolgen.

Das Ziel dieser Arbeit stellt damit die Bewertung der Energieeffizienz der wässrigen Bauteilreinigung dar. Die Bewertung soll auf den grundlegenden, physikochemischen Wirkzusammenhängen beruhen und damit eine breite Anwendungsmöglichkeit zur Ermittlung der Energieeffizienz von industriellen Bauteilreinigungsverfahren bieten.

2 Stand des Wissens in Theorie und Praxis

In diesem Kapitel sollen die bestehende und aktuelle Wissensbasis der wässrigen Bauteilreinigung und der Energieeffizienz im Industriesektor beschrieben werden. Aus dieser Erläuterung wird der Bedarf an einer grundlegenden Analyse für die Thematik von Bewertungssystemen der Energieeffizienz von wässrigen Bauteilreinigungsanlagen sehr deutlich. Für eine systematische Aufarbeitung soll zunächst im Unterkapitel 2.1 das Fertigungsverfahren Bauteilreinigung beschrieben werden. Die Verfahrensauswahl (2.1.1) und Anlagentechnik (2.1.2) unter Berücksichtigung geltender Richtlinien und Normen (2.1.3) beschreiben den Stand der Technik, wie er in der Praxis Anwendung findet. Darüber hinaus wird auch die wissenschaftliche Aufarbeitung der industriellen Bauteilreinigung zusammenfassend dargestellt.

Im Unterkapitel 2.2 werden die praktischen und wissenschaftlichen Erkenntnisse der Energieeffizienz im Bereich der Industrie erläutert. Hierbei wird der Fokus auf die Methoden zur Bewertung und Ermittlung von Energiekennzahlen gelegt. Ebenfalls wird der Wissensstand zur Energieeffizienz im Bereich der Oberflächentechnik und Bauteilreinigung analysiert. Da das politische Rahmenfeld und die geltende Normen bzw. Gesetze die größten Triebkräfte hinter Energiebedarfsoptimierungen und Energiekennzahlenermittlungen der Industrie sind, werden sie im Abschnitt 2.2.3 beschrieben.

Abschließend soll eine Zusammenfassung der veröffentlichten Literatur und die Kenntnisse der Praxis, die Notwendigkeit der vorliegenden Arbeit begründen.

2.1 Industrielle Bauteilreinigung im Umfeld der metallverarbeitenden Produktion

Die Entwicklung der industriellen Bauteilreinigung in den zurückliegenden Dekaden lässt sich an einem Beispiel der Motorenfertigung in der Automobilproduktion ableiten. Anhand der Meilensteine der Motorenentwicklung zeigt sich der Bedeutungsgewinn der wässrigen Bauteilreinigung, wie er in der Grafik in Abb. 2-1 dargestellt ist.

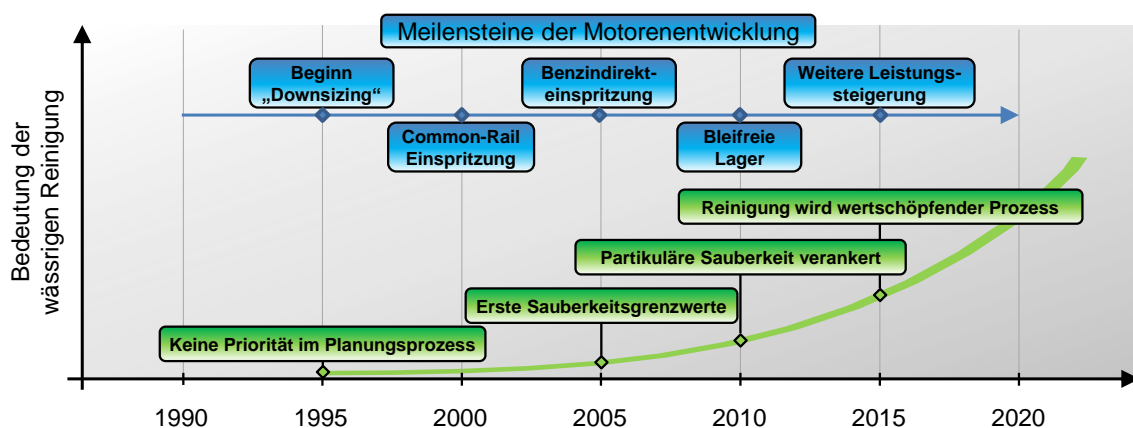


Abb. 2-1: Wichtige Meilensteine der Automobilproduktion und die wachsende Bedeutung der Bauteilreinigungsprozesse¹¹

¹¹ Eigene Darstellung. Vgl. GROSSMANN 2015.

Durch die technische Weiterentwicklung der Motoren war eine ebenso stetige Anpassung der Oberflächengüte der Bauteile und Komponenten erforderlich. Dies mündete darin, dass die Bauteilreinigung als wertschöpfender Prozess in die Planung und Produktion integriert ist.

Die gestiegenen Anforderungen an die Reinigungsprozesse machten es erforderlich, die Funktionsweisen und phänomenologischen Abläufe besser zu verstehen. Die Sicherstellung der definierten Qualitätsstandards der Fertigung steht dabei im Fokus der Optimierung.¹² Wie eine geeignete Verfahrensauswahl und dazu passende Anlagentechnik erfolgen, wird in den nächsten Abschnitten erläutert.

2.1.1 Verfahrensauswahl

Die Auswahl von Verfahren für die Reinigungsbehandlung von Werkstücken stellt die Produktionsplaner vor große Herausforderungen. Zahlreiche Einflussfaktoren müssen bei der Auslegung von Verfahren und Anlagen berücksichtigt werden. Wesentliche Punkte in Form einer Checkliste zur Planung eines Reinigungsprozesses sind in Abb. 2-2 zusammengefasst.

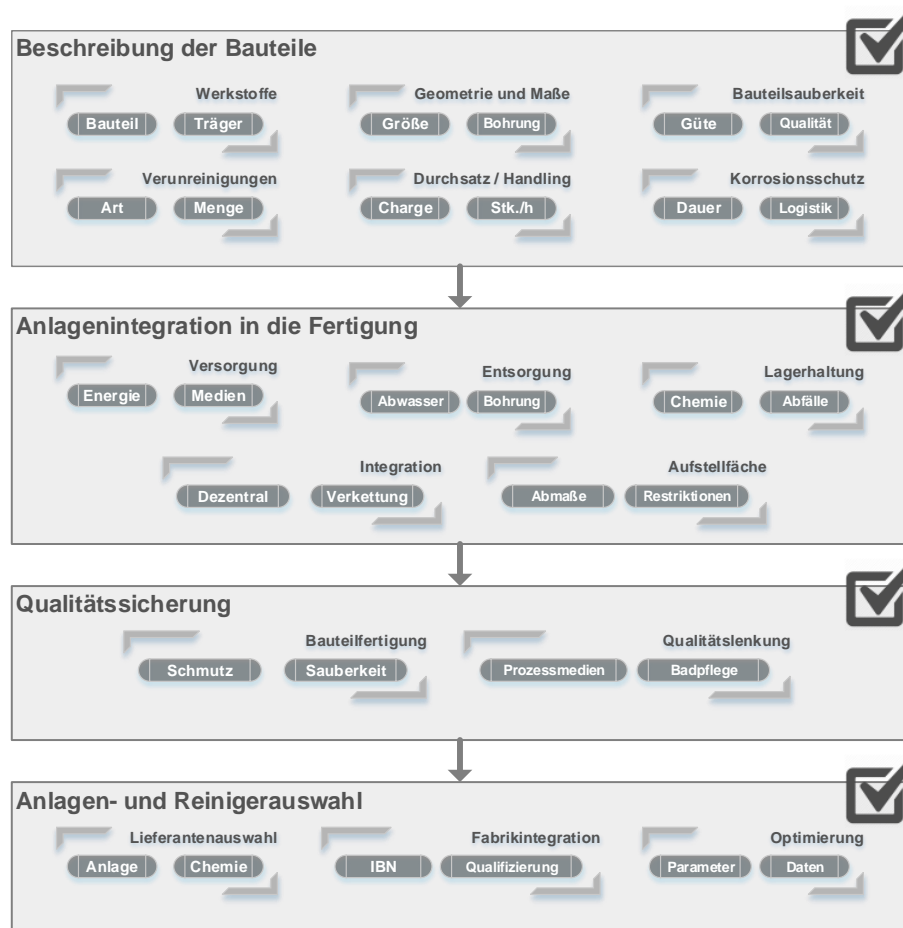


Abb. 2-2: Checkliste zur Planung eines Reinigungsprozesses¹³

Die Checkliste gibt die wichtigsten Punkte für die Planung eines Reinigungsprozesses wieder. Zu Beginn müssen die Bauteile beschrieben werden. Es müssen die Werkstoffe aller bei

¹² S. Schulz 2018; Rochowicz 2018.

¹³ Eigene Darstellung. Vgl. Schulze 2017, S. 3–12.

der Reinigung beteiligten Komponenten, wie die Bauteile oder Werkstückträger, bekannt sein. Daneben müssen auch Geometrie und Abmaße ermittelt werden und die für die Reinigung relevanten Besonderheiten, wie Bohrungen oder Hinterschneidungen, analysiert sein. Wichtig sind darüber hinaus die Definitionen der erforderlichen technischen Sauberkeit und die vorliegenden Verunreinigungen. Zur vollständigen Bauteilbeschreibungen sind der Durchsatz und Informationen zum Bauteilhandling zu berücksichtigen, insbesondere wie nach der Reinigung die Bauteile logistischen Prozessen unterworfen sind. Diese legen spezifische Anforderungen an den Korrosionsschutz fest.

Die Gründe für eine Bauteilreinigung können vielfältig sein. Die Ergebnisse von befragten Unternehmen, zu welchem Zweck sie Reinigungsverfahren verwenden, ist in Abb. 2-3 dargestellt.

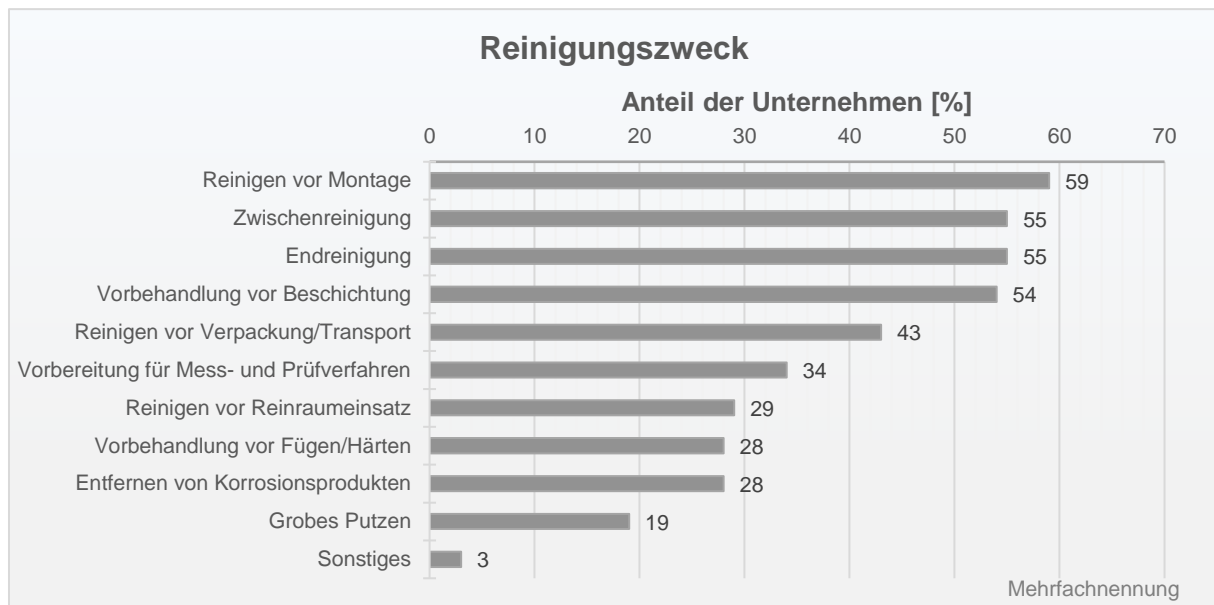
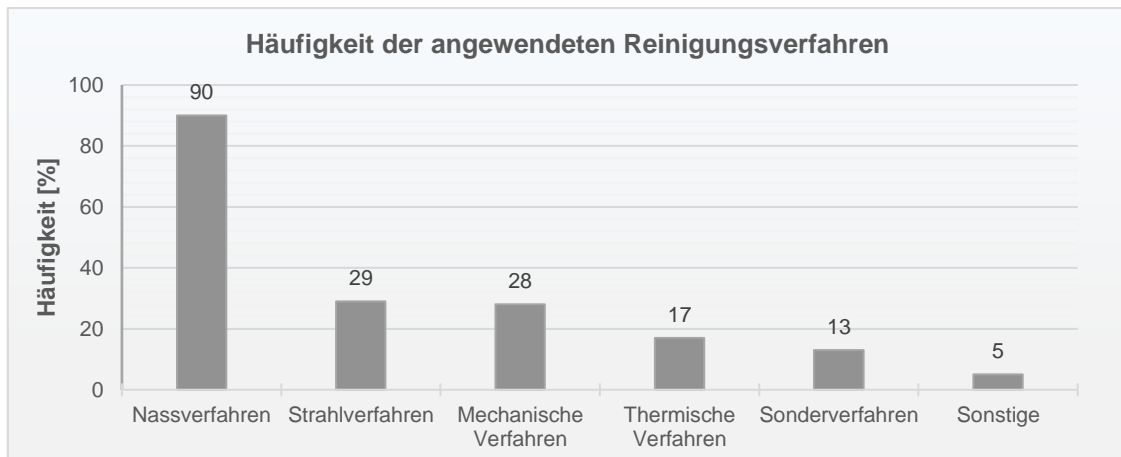


Abb. 2-3: Gründe für ein Reinigungsverfahren unter befragten Unternehmen¹⁴

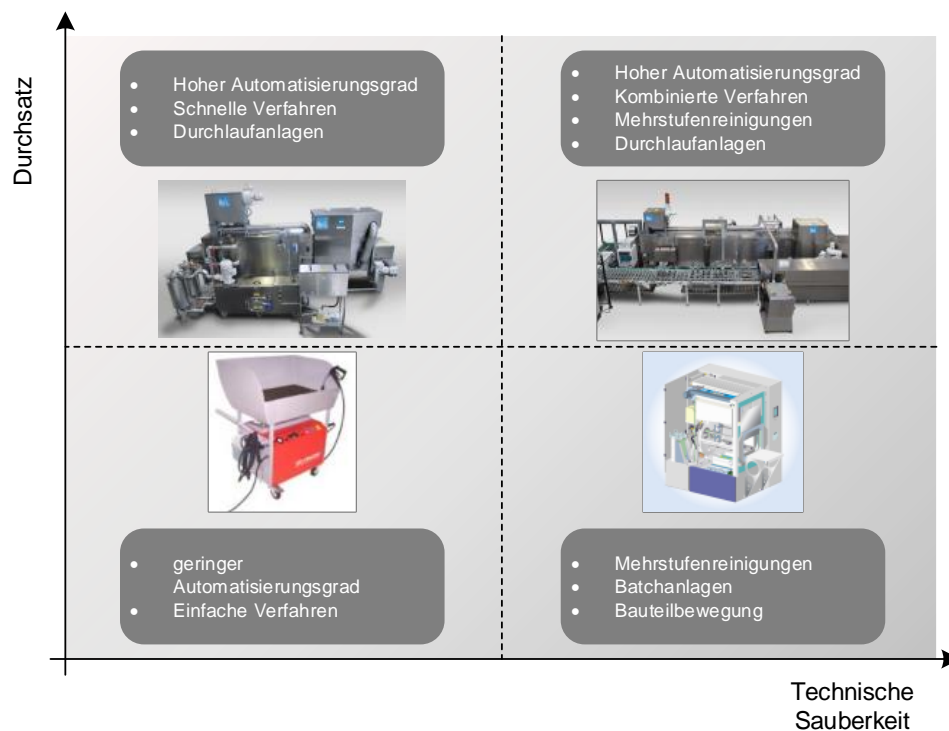
Am häufigsten müssen Bauteile vor der Montage entfettet werden. Die Zwischenreinigung, die Endreinigung und Beschichtungsvorbereitungen sind ebenfalls bei über der Hälfte der Unternehmen Gründe zum Reinigen der Bauteile. Für diese Reinigungszwecke, entsprechend den oben genannten Planungsgrundsätzen, werden verschiedenste Reinigungsverfahren eingesetzt. Die Häufigkeiten der Reinigungsverfahren bei derselben Umfrage unter den Unternehmen sind im Diagramm der Abb. 2-4 dargestellt. Unter den angewendeten Nassverfahren sind Spritz-, Ultraschall-, und Tauchreinigung die am häufigsten eingesetzten. Anwendungsspezifisch werden die verschiedenen Verfahren ebenso kombiniert eingesetzt, um den Anforderungen und unterschiedlichen Einflussfaktoren gerecht werden zu können.

¹⁴ Eigene Darstellung. Vgl. Bilz et al. 2013, S. 31.

Abb. 2-4: Angewendete Reinigungsverfahren; Mehrfachnennung möglich¹⁵

2.1.2 Anlagentechnik

So vielfältig die Reinigungszwecke und –verfahren ausfallen, so zahlreich sind die dafür im Einsatz befindlichen Anlagentechniken. Im Wesentlichen hängt die Ausführung der gewählten Anlage von dem Grad der erforderlichen Sauberkeit und der Durchsatzmenge der Bauteile ab.¹⁶ In Abb. 2-5 ist eine einfache Strukturierung der verschiedenen Anlagentechnik im Bereich der industriellen Bauteilreinigung dargestellt.

Abb. 2-5: Übersicht und Einteilung der Anlagentechnik für die industrielle Reinigung¹⁷

¹⁵ Eigene Darstellung. Die Nassverfahren lassen sich weiter unterteilen wobei Ultraschallreinigung, Tauchreinigung und Spritzreinigung mit großen Abstand am häufigsten eingesetzt werden, vgl. Bilz et al. 2013, S. 21–23.

¹⁶ S. Wullstein 2004, S. 9.

¹⁷ Eigene Darstellung. Bildquellen im Uhrzeigersinn, beginnend oben links: BVL Oberflächentechnik GmbH, BVL Oberflächentechnik GmbH, MAFAC GmbH, ph-cleantec GmbH

Bei geringen Anforderungen an die technische Sauberkeit und geringen Stückzahlen kann die Reinigung über manuell zu bedienende Waschtische erfolgen, s. Abb. 2-5 unten links. Im Gegensatz dazu können Reinigungsanlagen für hohe Ansprüche an die Reinigungsleistung und entsprechenden Durchsätze sehr komplexe Systeme bilden, die mehrere verschiedene Reinigungsverfahren kombinieren und durch einen hohen Automatisierungsgrad autonom betrieben werden.

Allen Anlagen gemein sind die drei Elemente, die für eine Reinigungsanlage benötigt werden.¹⁸

- Reinigungsort in Form einer Kammer oder Becken
- Medienzuführung- und Sammelbehälter
- Verunreinigungssammlung und -extraktion

Dafür müssen entsprechende Komponenten und Aggregate verbaut werden, die sich häufig in einem dafür vorgesehenen Maschinenraum befinden. Neben diesen Basisbaugruppen besitzt die Reinigungsanlage je nach Funktionsanforderungen weitere Komponenten zur Trocknung, Chemiezuführung, Medienaufbereitung und in großem Umfang EMSR-Technik. Die Ausstattung für den letztgenannten Bereich wird zukünftig sehr viel ausgeprägter vorhanden sein. Qualitätsüberwachung und Prozesskontrolle durch die Methoden der Digitalisierung sind in vielen Veröffentlichungen zentrales Thema.¹⁹

2.1.3 Richtlinien und Normen

Definiert werden kann die Reinigung als das „Entfernen unerwünschter Stoffe (Verunreinigungen) von der Oberfläche von Werkstücken bis zu einem erforderlichen, vereinbarten oder möglichen Grad.“²⁰ Die DIN-Norm 8592 unterteilt das Reinigen nach der Reinigungsmethode. Dabei werden u. a. das Reinigungsstrahlen, mechanisches und strömungstechnisches Reinigen untergliedert, wie es in Abb. 2-6 dargestellt ist.

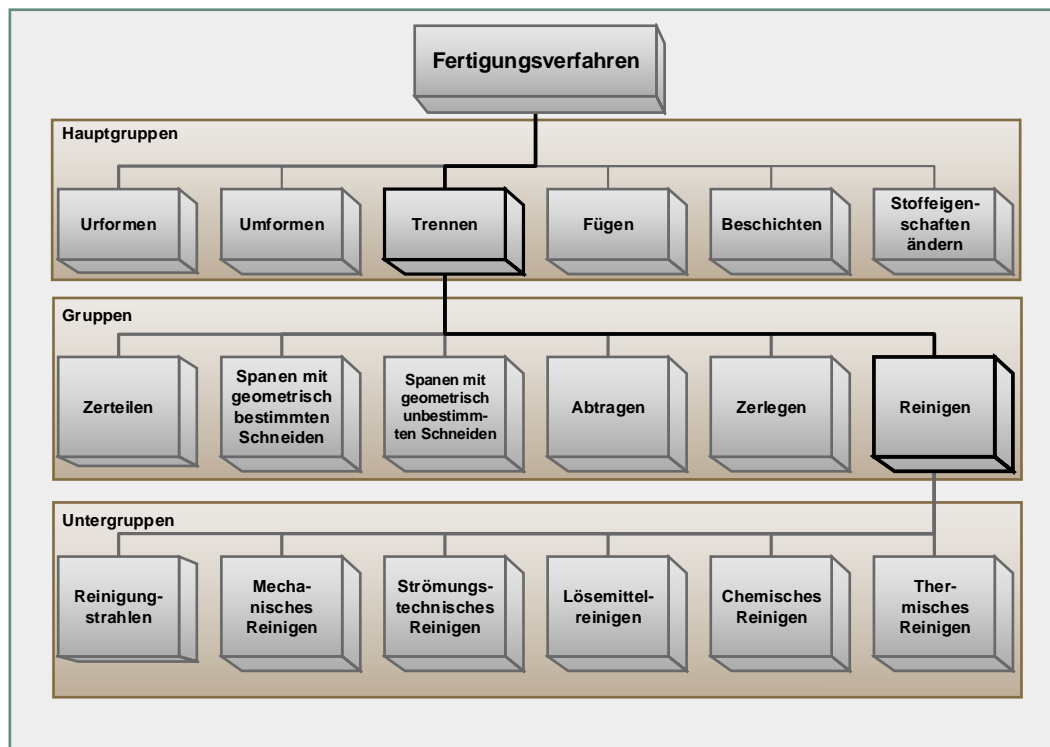
Diese Untergruppen fassen wiederum verschiedene Einzelverfahren zusammen. So unterscheidet die Untergruppe strömungstechnisches Reinigen unter der Definition „Reinigen, wobei lose anhaftende Verunreinigungen durch strömende Gase oder Flüssigkeiten entfernt werden“²¹ die Verfahren Waschen (Spülen), Abblasen, Absaugen, Ultraschallreinigen und Lösemittelreinigen. In Anlagen der wässrigen Bauteilreinigung können verschiedene Wirkprinzipien zur Reinigung eingesetzt werden, was eine Zuordnung dieser Anlagen erschwert.

¹⁸ Vgl. Mittal und Jaiswal 2015, S. 228.

¹⁹ S. Schulze 2018; Kimmel et al. 2018; Oetjen und Willers 2018; Schulz 2017; Heneka 2018.

²⁰ Vgl. DIN 8592, S. 3 Unter der Anmerkung: Der erreichbare Reinheitsgrad ist abhängig vom Reinigungsverfahren sowie von der Art und Beschaffenheit der Verunreinigungen.

²¹ S. DIN 8592, S. 4.

Abb. 2-6: Einteilung der Reinigung als Fertigungsverfahren²²

Über die verschiedenen Reinigungsverfahren und deren Definitionen sind in den vergangenen Jahren zwei Richtlinien erarbeitet worden, die den praktischen Umgang mit der technischen Sauberkeit in der Automobilproduktion²³ und Montage²⁴ festlegen. Erstere gibt einen umfassenden Überblick zur Prüfung der technischen Sauberkeit. Dazu werden die Sauberkeitsspezifikationen festgelegt und eine umfangreiche Hilfestellung zur Auswahl geeigneter Prüfmethode gegeben. Anhand von Beispiele werden Extraktionsverfahren beschrieben und dem Nutzer Anleitungen gegeben, wie die gewonnenen Ergebnisse der Analysen interpretiert werden können.

Um qualifizierte Maßnahmen zur technischen Sauberkeit in der Montage umzusetzen, gibt die zweite Richtlinie Hilfestellungen zur Erzeugung geeigneter Montageumgebungen und optimaler Logistikprozesse zur Minimierung der Verunreinigungsquellen. Gleichzeitig werden die entscheidenden Merkmale eines qualifizierten Personals erläutert und deren Montageeinrichtungen beschrieben, um eine technische Sauberkeit in der Produktion und Montage etablieren zu können. Die beiden Richtlinien beziehen sich in weiten Inhaltsbereichen auf vorhandene internationale Standards.²⁵

Für die industrielle Reinigung maßgebliche gesetzliche Verordnung ist die europäische Verordnung zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH).²⁶ Unter diese Verordnung fallen viele der eingesetzten chemischen Reinigungsmittel. Durch entsprechende Beschränkungen für den Einsatz bestimmter Substanzen ist sie

²² Eigene Darstellung. Vgl. DIN 8592.

²³ S. VDA-Richtlinie 19.1.

²⁴ S. VDA-Richtlinie 19.2.

²⁵ S. ISO 16232.

²⁶ S. Europäisches Parlament und Rat 18.12.2006.

auch für den Rückgang der Lösemittelreinigung als häufig genutztes Verfahren in der metallverarbeitenden Produktion verantwortlich.²⁷

2.1.4 Wissenschaftliche Aufarbeitung im Bereich der industriellen Bauteilreinigung

Das bestehende Wissen im Bereich der industriellen Bauteilreinigung beruht zu einem großen Teil auf empirischen Untersuchungen und Entwicklungen aus der praktischen Anwendung der Industrie. Die wissenschaftliche Aufarbeitung in diesem Bereich ist sehr überschaubar.²⁸ Eine umfangreiche Analyse und Entwicklung eines Leitfadens zur Auswahl und Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen erbrachten zwei Dissertation der TU Dortmund.²⁹

Die erste Arbeit beinhaltete eine dezidierte Beschreibung der in der allgemeinen Praxis angewandten Reinigungsverfahren und Anlagen. Dabei wurden die wesentlichen Prozessparameter beschreiben und als Datenbank für ein Fachinformationssystem aufbereitet. Die zweite Arbeit griff diese Grundlagen auf und erweiterte die Datenbank durch ein webbasiertes Auswahl- und Auslegungssystem, womit Benutzer anhand verschiedener Abfragen, vergleichbar mit der Checkliste aus Abb. 2-2, Vorschläge für geeignete Reinigungsverfahren und Anlagen erhielten. Die Arbeitsweise des entwickelten, webbasierten Fachinformationssystems ist schematisch in Abb. 2-7 dargestellt.

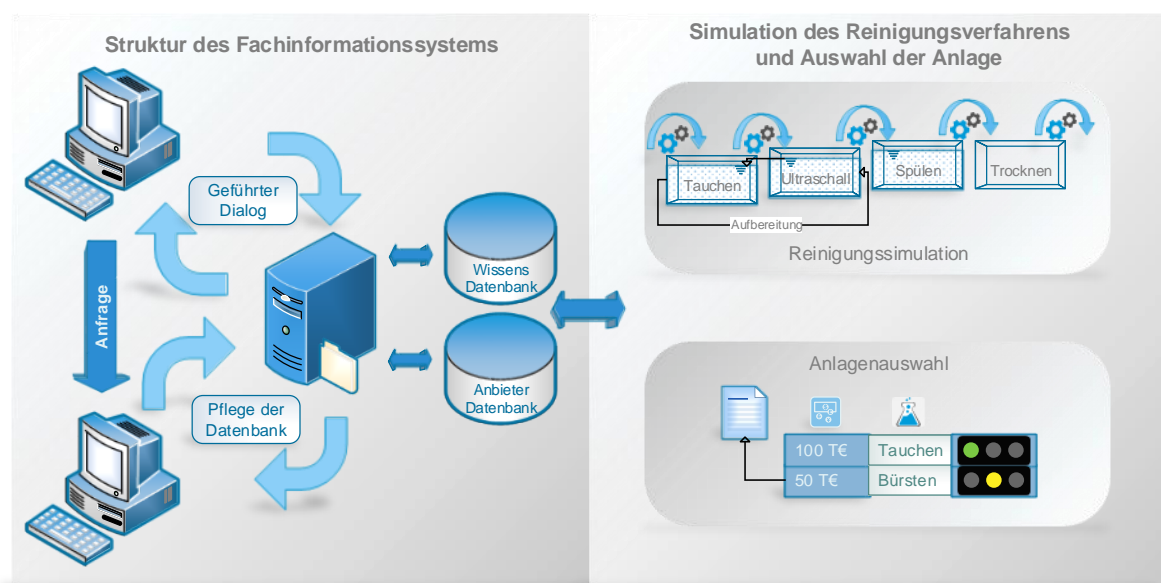


Abb. 2-7: Struktur eines webbasierten Fachinformationssystems darin enthaltene Arbeitsweise der Datenbanken für die Simulation des Reinigungsverfahrens und Auswahl geeigneter Reinigungsanlagen³⁰

Gerade im Falle der Simulation der Reinigungsverfahren wurden viele parameterabhängige Funktionszusammenhänge der jeweiligen Reinigungsverfahren abgeleitet.³¹

²⁷ S. Inventec Performance Chemicals Deutschland 2012.

²⁸ Als Indikator für die Richtigkeit der These kann der Anteil der veröffentlichten Artikel mit dem Thema Bauteilreinigung in der Fachzeitschrift mit der höchsten Reputation für Produktionstechnik - CIRP Annals – herangezogen werden. Von den 5.238 Veröffentlichungen seit der Erstauflage 1980 ist kein einziger enthalten, der die Bauteilreinigung im Fokus behandelt (Stand 06.12.2018).

²⁹ S. Kloke 2003; Wullstein 2004.

³⁰ Eigene Darstellung. Vgl. Kloke 2003, S. 143; Wullstein 2004, S. 73.

³¹ S. Wullstein 2004, 96ff.

2.2 Energieeffizienz in der Industrie

Der Sektor der Industrie ist der zweitgrößte Endenergieverbraucher in Deutschland. Mit 717 TWh ist er für etwa 25 % des Gesamtbedarfs verantwortlich, s. Abb. 2-8.

Entwicklung des Endenergieverbrauchs nach Sektoren

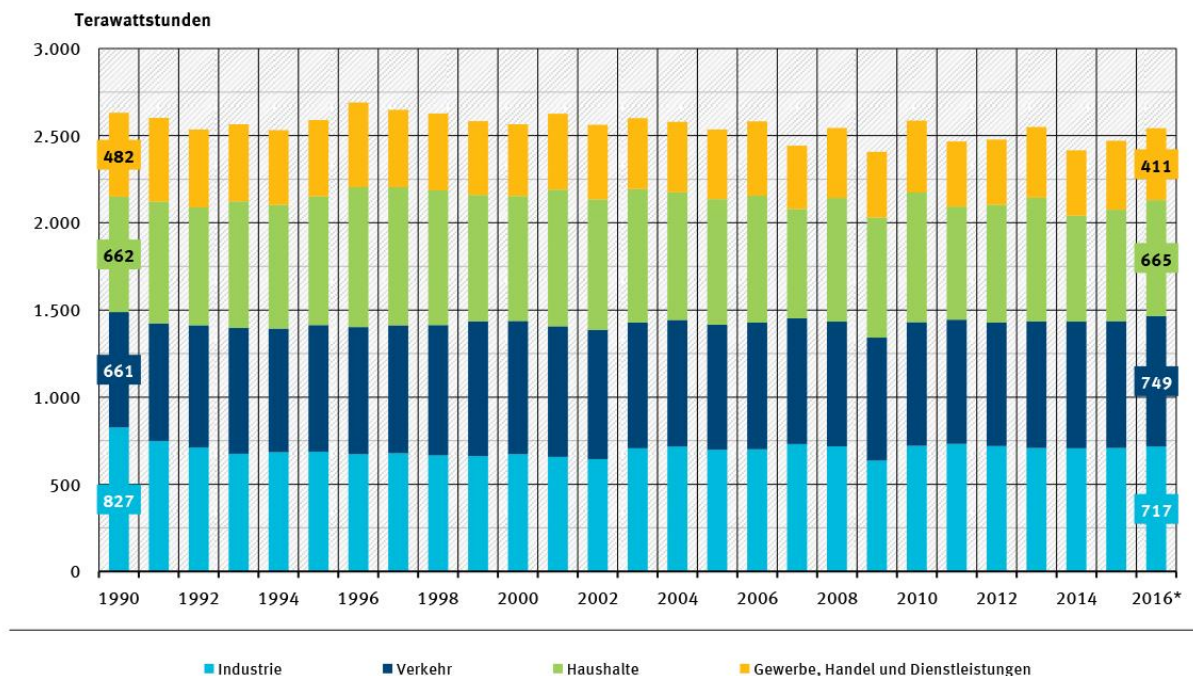


Abb. 2-8: Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Sektoren in Deutschland; Stand Sept. 2017³²

Die relative Konstanz des Energiebedarfs der Industrie geht einher mit einer gleichzeitigen stetigen Zunahme der Bruttowertschöpfung um über 100 %³³, sodass eine enorme Bruttoenergieeffizienzsteigerung erreicht wurde. Die Energiekosten für den Industriesektor stiegen im gleichen Betrachtungszeitraum um 200 % und können als wesentliche Triebkraft zur Energieeffizienzsteigerung gelten.³⁴

Diese Entwicklungen zeigen deutlich, dass Unternehmen in zunehmenden Maße auf eine Bewertung, Kontrolle und Reduzierung ihrer Energiekosten angewiesen sind. Strategisch werden die Unternehmen dabei durch politische Instrumente für systematische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz gelenkt.³⁵ Gerade im Bereich der Metallverarbeitung und der industriellen Bauteilreinigung ist der Energiebedarf ein wichtiger Faktor. Dies liegt an der großen Hebelwirkung durch anteilig große Energiebedarfe bei der Bauteilreinigung, wie sie in Abb. 2-9 dargestellt ist.

³² Bildquelle: AG Energiebilanzen (https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/2_abb_entw-eev-sektoren_2018-02-14_0.pdf; abgerufen 07.12.2018)

³³ Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamts für den Zeitraum von 1991-2017 (<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/VGR/VolkswirtschaftlicheGesamtrechnungen.html>; abgerufen 07.12.2018)

³⁴ Zahlen und Fakten der Deutschen Energieagentur GmbH (dena) (<https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/unternehmen/>; abgerufen 07.12.2018)

³⁵ S. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2014.

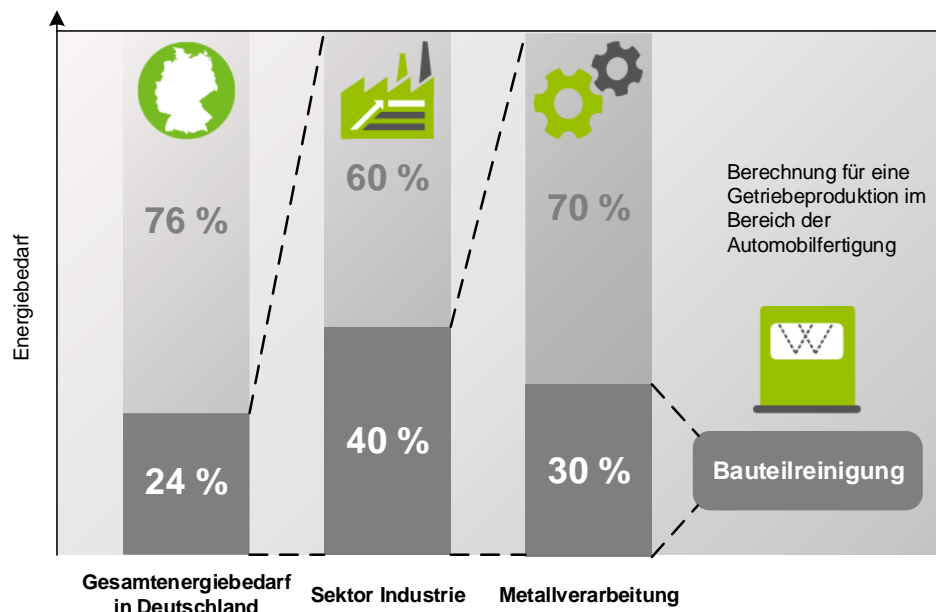


Abb. 2-9: Anteile des Energiebedarfs des Sektor Industrie, darin enthalten die Metallverarbeitung und Reinigungsverfahren³⁶

Die prozentuale Auflösung der Energiebedarfe in den einzelnen Bereichen macht sehr deutlich, dass die Thematik der Energieeffizienz für die industrielle Bauteilreinigung im Fokus von Herstellern und Anwendern der Anlagen steht.

Die Literatur beschreibt verschiedene Phänomene für die Tatsache, dass die Technologien und Maßnahmen für eine Steigerung der Energieeffizienz bekannt sind, jedoch nicht umgesetzt sind.³⁷ Dieser Effekt wird als Energieeffizienzlücke bezeichnet und ist in Abb. 2-10 veranschaulicht.

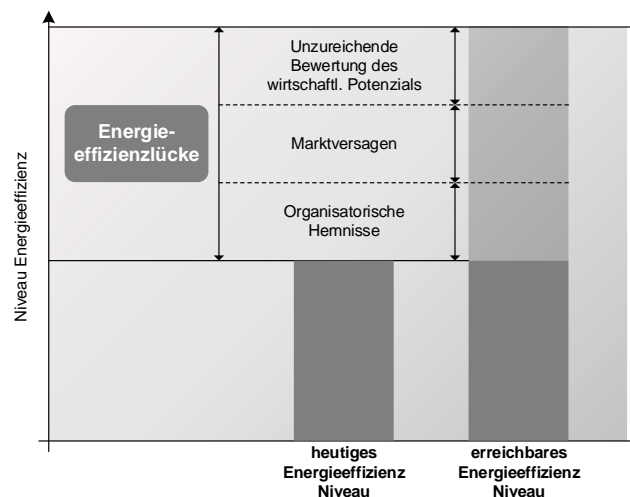


Abb. 2-10: Schematische Darstellung der als Energieeffizienzlücke bezeichneten Niveauunterschied zwischen dem IST-Stand der Energieeffizienz und einem erreichbaren, optimierten System³⁸

³⁶ Eigene Darstellung. Die Anteile der Metallverarbeitung sind als Bilanzsumme der energieintensiven Produktionsbereiche gebildet, s. Lehr et al. 2017, S. 16 Der Anteil der Bauteilreinigung an der Produktion basiert auf der Messung einer Beispielproduktion und Expertengesprächen eines Herstellers von Bauteilreinigungsanlagen.

³⁷ Vgl. Eisele 2014; Schmid 2004; Jaffe und Stavins 1994.

³⁸ Eigene Darstellung. Vgl. Eisele 2014, S. 24.

Der Niveauunterschied zwischen der heutigen Energieeffizienz eines Systems und eines potenziell möglichen wird begründet durch

- Organisatorische Hemmnisse - die als Strukturen oder Abläufe innerhalb des Unternehmens Energieeffizienzmaßnahmen verhindern.
- Marktversagen – das als nicht effizienter Einsatz von Energie, da passende Effizienzmaßnahmen durch Fehlinformationen nicht oder falsch angewendet werden, in Erscheinung tritt.
- Unzureichende Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials – als fehlende oder unzureichende Bewertungsmöglichkeit in allen eingreifenden

Die bisherigen Veröffentlichungen zur Auseinandersetzung mit der Energieeffizienz von Produktionsanlagen und im Speziellen im Bereich der Oberflächentechnik und Bauteilreinigung werden in den kommenden beiden Abschnitten diskutiert.

2.2.1 Energieeffizienz von Produktionsanlagen

Die Auseinandersetzung mit dem Thema der Energieeffizienz von Produktionsanlagen wird in der Literatur ausführlich geführt. Die energetischen Analysen von Fertigungsprozessen sowie Maschinen unterscheidet sich hinsichtlich der Abstraktionsebene. Daraus ergeben sich höchst unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten und Erkenntnisgewinne.

Manche Untersuchungen wollen den energetischen Aufwand von Fertigungsprozessen auf einem allgemeinen Niveau ermitteln, um Daten für die Durchführung von Life-Cycle-Assessments zu gewinnen oder unterschiedliche Verfahren bzw. Technologien miteinander vergleichen zu können. Dazu werden thermodynamische Bilanzierungen von Prozessen vorgeschlagen und geeignete Modelle der Prozesse skizziert.³⁹

Dazu werden grundlegende Gleichungen der Massen- und Energiebilanzen aufgestellt.⁴⁰ Zusätzlich nutzen sie das Konzept der Exergie, die aus einem System gewonnen werden kann, wenn es reversibel mit seiner Umgebung einen Gleichgewichtszustand gebracht wird. Mit Hilfe dieser Methodik wird der Fokus auf chemische Exergie der relevanten Materialien im Prozess gelegt. Dabei wird der gesamte Prozess energetisch als Blackbox betrachtet. Das bedeutet, dass Eingangs- und Ausgangsgrößen nicht in einen allgemein gültigen Wirkzusammenhang gestellt werden, sondern nur für den vermessenen Einzelfall beschreibbar sind.

Eine weitere Arbeit fokussiert sich auf die Beschreibung der benötigten elektrischen Energie von Werkzeugmaschinen.⁴¹ Die Autoren basieren ihre Untersuchungen auf elektrischer Leistungsvermessung und leiten ein lineares Modell des elektrischen Energiebedarfs in Abhängigkeit von der Masse des bearbeiteten Materials ab. Ein konstanter Energiebedarf liegt darin begründet, eine Maschine in einem produktionsbereiten Zustand zu halten, während eine spezifische zusätzliche Energie pro Masse Material bei der Bearbeitung hinzukommt. Dieser Zusammenhang trifft allgemein auf Fertigungsprozesse zu.⁴² Dabei werden die Konstanten

³⁹ S. Branham et al. 2008, S. 2; Gutowski et al. 2007, S. 138; Gutowski et al. 2006, S. 624.

⁴⁰ S. Branham et al. 2008, 1ff.

⁴¹ S. Dahmus und Gutowski 2004.

⁴² S. Gutowski et al. 2009, S. 1587.

des Modells für unterschiedliche Verfahren aus verschiedenen Angaben der Literatur ermittelt.⁴³ Die Autoren erkennen als Probleme ihres Modells v. a. die Variation der Gleichungsparameter durch verschiedene Prozessdurchsatzraten oder unterschiedliche Konfigurationen von Maschinen. Die Abschätzungen sind nicht maschinenspezifisch und es können keine einzelnen Subsysteme oder Komponenten untersucht werden.

Die erwähnten Arbeiten zu einzelnen Fertigungsprozessen modellieren den Energiebedarf von Prozessen analytisch. So wird der Energiebedarf, des Werkzeugverbrauchs und die Abfallgenerierung von Werkzeugmaschinen auf Basis von Prozessparametern des Schneidprozesses analysiert.⁴⁴ Vernachlässigt werden dabei sämtliche Ineffizienzen sowie Hilfs- und Umgebungsprozesse.

Eine energetische Systembetrachtung⁴⁵ von Bearbeitungsmaschinen durch elektrische Energiemessung lässt erkennen, dass Maschinen weit mehr Energie für Hilfsaggregate und Umgebungsequipment als für den eigentlichen Materialabtragprozess benötigen. Diese Analyse macht eine Abschätzung der benötigten Energie für die Durchführung eines Prozesses mit einer Maschine einer bestimmten Klasse möglich. Allerdings geht die Analyse nicht auf die Mechanismen und Energieströme der Maschinen ein. Die grobe Beschreibung auf Systemlevel, ermöglicht keine Parametrisierung oder die Evaluierung von möglichen Maßnahmen an den Maschinen. Spezifische Nutzungsprofile der Maschinen sind somit nicht mit abgebildet.⁴⁶

Es wird daher festgestellt, dass keine effektive und ganzheitliche Methode zur Modellierung und Vorhersage des Energieverbrauchs einer Werkzeugmaschine gibt, die alle energieverbrauchenden Prozesse berücksichtigt.⁴⁷

Die Autoren entwickeln in ihrem Artikel einen Ansatz für ein empirisches Modell, das auf Leistungsvermessung der Maschine beruht. Sie nutzen unterschiedliche Zustände der Maschine, um durch eine Bilanzierung die unterschiedlichen Anteile des Energiebedarfs zu ermitteln. So wird es möglich, den Anteil unproduktiv erzeugter thermischer Energie in der Maschine zu ermitteln und eine bessere Modellierung unterschiedlicher Maschinenzustände und Subsysteme zu generieren.⁴⁸ Als Nachteil ihres Modells benennen die Autoren die Voraussetzung, dass immer eine Leistungsvermessung bei Variation von Maschinen- und Prozessparametern nötig ist, um das Modell aufzustellen.

Die Variation der Maschinen- und Prozesskonfiguration soll durch eine veröffentlichte Modellstruktur ermöglicht werden.⁴⁹ Dabei wird der Bearbeitungsprozess in einzelne Zustände der Maschine unterteilt. Die Autoren bemerken, dass häufig relativ konstante Leistungen für einzelne Maschinenfunktionen abgerufen werden. Sie merken an, dass im Fall von spezifischen Leistungen eines Prozesses, diese abhängig von Parametern ergänzt werden können. Auch andere Energieformen als nur elektrische Energie (hydraulische, pneumatische

⁴³ S. Gutowski et al. 2007, S. 137.

⁴⁴ Vgl. Munoz und Sheng 1995.

⁴⁵ Vgl. Dahmus und Gutowski 2004.

⁴⁶ Vgl. im Gegensatz dazu Eisele 2014; Kuhrke 2011.

⁴⁷ S. Li und Kara 2011, S. 1636.

⁴⁸ S. Li und Kara 2011, S. 1642.

⁴⁹ S. Dietmair und Verl 2008.

Energie etc.) werden bei der Analyse mitberücksichtigt.⁵⁰ Als Fazit der Arbeit lässt sich herausstellen, dass sich bereits durch die Annahme konstanter Leistungen ein guter Überblick über den Energieverbrauch der Maschine gewinnen lässt.

Für umfassende Energieanalysen müssen jedoch alle Energie- und Masseströme in eine Analyse eingeschlossen werden.⁵¹ Zusätzlich muss die energetische Kopplung der einzelnen Subsysteme und Komponenten über die gegenseitige Erwärmung der Maschine betrachtet werden.

Beim Problem der Modellierung der unproduktiven Energie wird darauf verwiesen, dass gerade thermischer Vorgänge und die Erzeugung thermischer Energie in einem komplexen System einer Maschine schwierig zu modellieren sind.⁵² Dies zeigt sich beispielhaft für die Modellierung der energetischen Verluste und Temperaturverteilungen in einer Hochgeschwindigkeitsspindel.⁵³ Die Autoren kommen darin zu dem Schluss, dass die präzise Modellierung ein sehr komplexes Problem ist, das großen Aufwand mit sich bringt.⁵⁴ Die Literatur hebt hervor, dass die Komplexität der Vorgänge und damit einhergehende Limitationen eine Modellierung äußerst schwer machen und sie daher davon ausgehen, dass genaue Modelle auch in der Zukunft weiter von experimentellem Charakter sein werden.⁵⁵

Andere Arbeiten beschäftigen sich mit Wärmeerzeugungs- und deren –transportvorgängen, jedoch auf einem Niveau reduzierter Komplexität.⁵⁶ Vereinfachte Ersatzmodelle der Maschinen und Komponenten ermöglichen analytische Berechnungen der thermischen Vorgänge. Die Ergebnisse können von den Autoren als ausreichend genau verifiziert werden.

Ein weiterer sehr genauer Ansatz zur Modellierung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen ist ebenfalls veröffentlicht worden.⁵⁷ Diese Modellierung soll bereits auf einer eingeschränkten Informationsbasis im Stadium der Fertigungsplanung möglich sein. Dabei werden einzelne Komponenten und Module von Maschinen softwareseitig modelliert und generisch zu Maschinen zusammengesetzt. Mit Hilfe dieser virtuellen Maschinen sollen Prozesse simuliert und abgeschätzt werden können.

2.2.2 Energieeffizienz im Bereich der Oberflächentechnik und Bauteilreinigung

In der Literatur kann festgestellt werden, dass bei der Betrachtung ökologischer Auswirkungen der Produktion der Prozess der Reinigung häufig betont wird.⁵⁸ Dabei sind die Anforderungen an die Reinheit und damit an den Prozess des Reinigens stark divers. Die Unterschiede beim Typ und beim Umfang des Reinigungsschritts machen nach Ansicht der Autoren allgemeine energetische Analysen des Prozesses schwierig.⁵⁹ Dabei stellen sie auch fest, dass bei den ökologischen Konsequenzen von Prozessen wie der Reinigung, der Fokus von der

⁵⁰ S. Dietmair und Verl 2008, S. 577.

⁵¹ Vgl. Blau et al. 2009.

⁵² S. Li und Kara 2011, S. 1644.

⁵³ Vgl. Jędrzejewski et al. 2005.

⁵⁴ Vgl. Abele et al. 2010, S. 781; Jędrzejewski et al. 2005, S. 620.

⁵⁵ S. Li und Kara 2011, S. 1642.

⁵⁶ S. Kipp 2008 zu Vorgängen in elektrischen Maschinen und Gleich 2008 zur Simulation von thermischen Vorgängen in Werkzeugmaschinen.

⁵⁷ S. Abele et al. 2012, S. 38.

⁵⁸ Vgl. Dahmus und Gutowski 2004, 643ff.

⁵⁹ S. Dahmus und Gutowski 2004, S. 649.

energetischen Betrachtung zur Untersuchung flüssiger oder gasförmiger Emissionen verschieben könnte.⁶⁰

Eine Analyse zum Energiebedarf und der Energiekennzahlenbildung wurde durch eine Erweiterung der Modellierung von Werkzeugmaschinen auf ganze Fertigungsketten entwickelt.⁶¹ Der Autor setzt sich mit einer Methode zur modellbasierten Integration des maschinenbezogenen Energiebedarfs in die Produktionsplanung zum ersten Mal mit der Berechnung von Energiebedarfen von Reinigungsanlagen auseinander. Hier werden Komponenten entsprechend ihrer Steuerungslogik aggregiert und anhand deren Aufrufbefehlen zeitlich energetisch erfasst. Die Leistungen werden anhand von Datenblattangaben gemittelt in die Energiebedarfsrechnung eingepflegt. Der simulative Ansatz wird mit Messungen einer Einkammerreinigungsanlage validiert.⁶²

Das Simulationsmodell wird mit physikalischen Funktionszusammenhängen beschrieben. Dazu zählen die Pumpenleistungen, die mit einem quadratischen Funktionsansatz und Leistungskennlinie berechnet werden, die Wärmeverluste als Funktion von Oberflächen- und Umgebungstemperaturen und weiterer Leistungen. Eine Würdigung der gegenseitigen energetischen Beeinflussung der einzelnen Komponente untereinander wird durch die Dauer und Häufigkeit des Anschaltens und deren Nominalleistung vorgenommen. Abhängig von der dynamischen Charakteristik (Konstant, Variabel, Linearität) werden als Kriterium für die Detailtiefe der Modelle 1-, 2- oder 3%-Anteil von der Gesamtanschlussleistung der Maschine gewählt.⁶³

In der Arbeit werden zum ersten Mal Energieeffizienzkennzahlen in Bezug zur Bauteilreinigung angeben. Diese bilden sich aus dem Energiebedarf pro Stück, einem CO₂-Emissionswert und einer gewichteten Vernetzungspotenzialkennziffer. Es handelt sich um eine nominale Kennziffer, die als Benchmark zu anderen Vergleichswerten in Beziehung gesetzt werden kann. Diese Optimalwerte sind jedoch frei gewählt, sodass die resultierende „Energieeffizienz“ ohne Validierung ermittelt wurde.⁶⁴

Eine in der Praxis anschauliche Darstellung für die bei der Reinigung wirksamen energetischen Elemente liefert der Sinnersche Waschkreis.⁶⁵ Der Autor zeigte durch empirische Studien, dass für eine reproduzierbare und qualitätssichernde Reinigung von Textilien immer die Elemente Temperatur, Chemie, Mechanik und Zeit wirken müssen. Wird ein Element anteilig reduziert, so muss diese durch eine Erhöhung der anderen Elemente ausgeglichen. Der Sinnersche Kreis ist in Abb. 2-11 dargestellt.

⁶⁰ S. Dahmus und Gutowski 2004, S. 650.

⁶¹ Vgl. Schrems 2014.

⁶² Vgl. Schrems 2014, S. 45.

⁶³ S. Schrems 2014, S. 51.

⁶⁴ S. Schrems 2014, S. 136.

⁶⁵ Vgl. Sinner 1960.

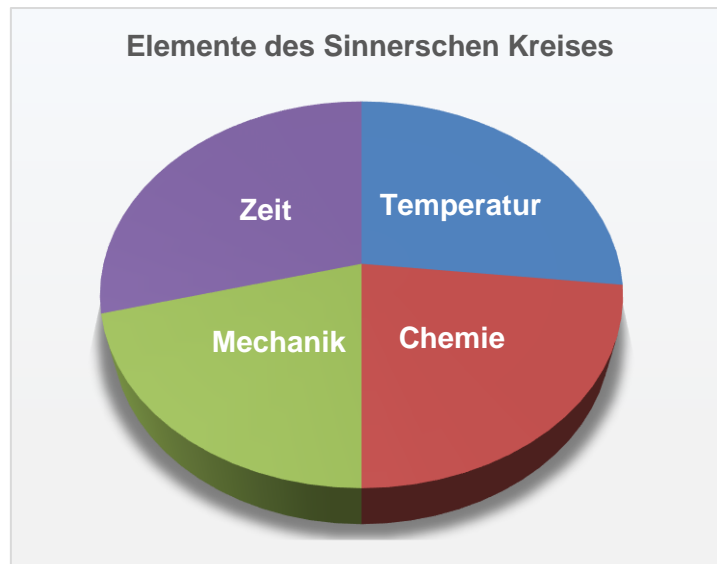


Abb. 2-11: Sinnerscher Kreis

Es finden sich verschiedene Erweiterungen und Ableitung von dieser Grundform in der Literatur.⁶⁶ Als Basis liefert er jedoch den Grundzusammenhang einer thermodynamischen Interpretation der Reinigung als Wirkung der Wärme, des chemischen Potenzials und Enthalpie.

Betrachtet man verschiedene in einer Fabrik für die Metallverarbeitung häufig eingesetzten Maschinen und die maßgeblichen Einflussfaktoren, so fällt auf, dass in sehr vielen Bereichen bereits viele Analysen und Studien dazu durchgeführt wurden. Gerade im Falle der Werkzeugmaschine sind auf verschiedenen Abstraktionsebenen die wesentlichen Variablen zur Energieeffizienz erarbeitet worden. Ebenfalls existiert eine gute Quellenlage bezüglich der Infrastruktur und dessen energetischen Verhaltens. Hierzu zählen Kältemaschinen und Heizung, Klima und Lüftung.

Zusammenfassend ist dies in der Tab. 2-1 aufgelistet. Für Kältemaschinen finden sich für zur Bewertung der Energieeffizienz Analysen zur Kälteleistung und den Kreislauftemperaturen. Werkzeugmaschinen sind sowohl grundlagenbasiert als auch im Umfeld der realen Produktion ausführlich beschrieben, s. Abschnitt 2.2.1. Ebenso sind Wärmebehandlungsöfen bereits Gegenstand von Energiebedarfsanalyse gewesen und die wichtigsten Parameter identifiziert werden.

Hingegen sind bei der Bauteilreinigung bezüglich der energetischen Abhängigkeit von einzelnen Einflussfaktoren keine Veröffentlichungen verfügbar. Lediglich direkte funktionale Zusammenhänge, dass die Badtemperatur oder die Reinigungszeit wesentlich für das Reinigungsergebnis sind, lassen sich durch entsprechende Veröffentlichungen finden, s. Abschnitt 2.1.1.

⁶⁶ S. u.a. Mauermann 2012, S. 3; Wildbrett 2006, S. 1623.

Tab. 2-1: Zusammenfassung von Einflussfaktoren auf Energiekennzahlen verschiedener Produktionsmaschinen und Produktionsinfrastruktur⁶⁷

Maschinen	Faktor	Quelle
Kältemaschinen	Kälteleistung	68
	Rücklauftemperatur	69
	Nebenaggregate	70
	Bearbeitungszeit	71
Werkzeugmaschinen	Werkstoff	72
	Vorschub	73
	Schnitttiefe	74
	Schneidstoff	75
Reinigungsmaschine	Badtemperatur	
	Trocknungslufttemperatur	
	Druckluftbedarf zum Trocknen	
	Reinigungszeit	
	Trocknungszeit	
	Bauteiltemperatur	
Wärmebehandlungsöfen	Brennwert Brennstoff	76
	Ofentemperatur	77
	aufzuheizendes Materialgewicht	78
	Eintrittstemperatur Material	79
	Anzahl der Mitarbeiter	80
Heizung, Lüftung, Klima	vorgegebene Temperatur	81
	Fläche	82

⁶⁷ Die Analyse zu den relevanten Einflussfaktoren auf die Energiekennzahlen der einzelnen Maschinen wurden im Rahmen der Masterthesis von Ley, B. (TU Darmstadt) zusammengetragen und überprüft.

⁶⁸ S. Junge und Holzäpfel 2011.

⁶⁹ S. Fußnote 68.

⁷⁰ S. Eisele und Abele 2013.

⁷¹ S. Fußnote 70.

⁷² S. Fußnote 70.

⁷³ S. Degner et al. 2015.

⁷⁴ S. Fußnote 73.

⁷⁵ S. Fußnote 73.

⁷⁶ S. Hans Lingl Anlagenbau und Verfahrenstechnik GmbH & co. KG 2012.

⁷⁷ S. Klümper-Westkamp et al. 2016.

⁷⁸ S. Fußnote 77.

⁷⁹ S. Fußnote 77.

⁸⁰ S. ABB STOTZ-KONTAKT GmbH 2011.

⁸¹ S. Abele et al. 2018.

⁸² S. Fußnote 81.

2.2.3 Richtlinien und Normen zur Energieeffizienz im produktionstechnischen Kontext

Mit der VDI-Richtlinie *Energiekenngrößen* wird die Nutzung von Energiekenngrößen als Ergebnis von Energiebilanzen beschrieben. Hierbei wird unterschieden zwischen Energiegrößen zur Analyse oder Steuerung⁸³. Die Abb. 2-12 gibt die verschiedenen Kennwertfunktionen wieder.

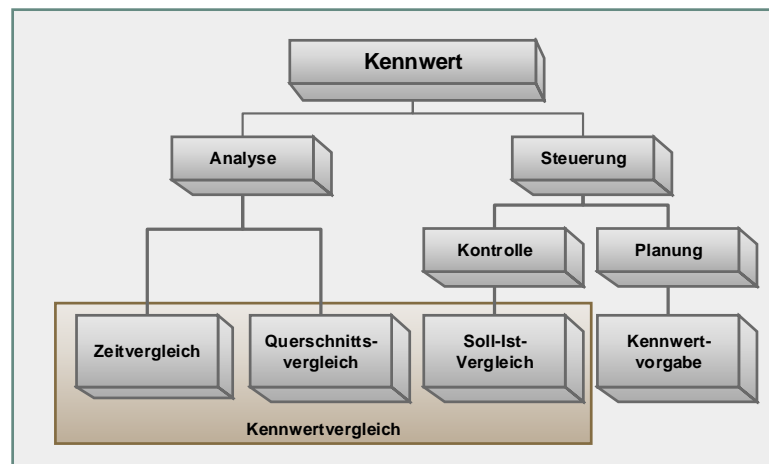


Abb. 2-12: Anwendungsmöglichkeiten von Kenngrößen⁸⁴

Die Richtlinie verbindet über die Beschreibung und Definition der physikalischen Grundlagen mit dem Vorgehen zum Aufstellen von Energiebilanzen. Dabei werden Anwendungsmöglichkeiten von Energiekennzahlen für ein Energiemanagementsystem (EnMS) aufgezeigt und wie sich durch die Erhebung energierelevanter Daten Benchmark-Projekte umsetzen lassen. Weiterhin wird eine Methodik zur Ermittlung und zum Vergleich von Energiekenngrößen erarbeitet. Daran lassen sich die wesentlichen Einflussfaktoren auf Energiekennzahlen analysieren und die Besonderheiten zur Datenerfassung und -verarbeitung berücksichtigen.

Im Jahr 2014 wurden die Arbeiten an den internationalen Standards für ein Energiemanagementsystem abgeschlossen und veröffentlicht.⁸⁵ Darin wird der Handlungsablauf und Etablierung für eines EnMS beschrieben. Die ISO 50001-Familie umfasst bisher sechs einzelne Standards. Anhand dieser können Standards und Anwendungsanleitungen können Unternehmen das eigene energetische Verhalten organisieren, durch⁸⁶

- Eine Zuordnung der Verantwortlichkeiten,
- Eine Definition eines Betrachtungsraumes,
- Eine Erarbeitung konkreter Ziele wie Maßnahmen,
- Eine prozessuale Umsetzung der Maßnahmen mit einem tauglichen Controlling
- Und eine entsprechende Dokumentation.

Das Zusammenwirken der einzelnen Standards bis zu einer Energiemanagementzertifizierung ist in Abb. 2-13 dargestellt.

⁸³ S. VDI 4661 S. 34ff

⁸⁴ Eigene Darstellung. Vgl. VDI-Richtlinie 4661, S. 35.

⁸⁵ Mittlerweile veröffentlicht mit der Revision 2018, s. ISO 50001.

⁸⁶ Vgl. Girbig 2017, S. 414.

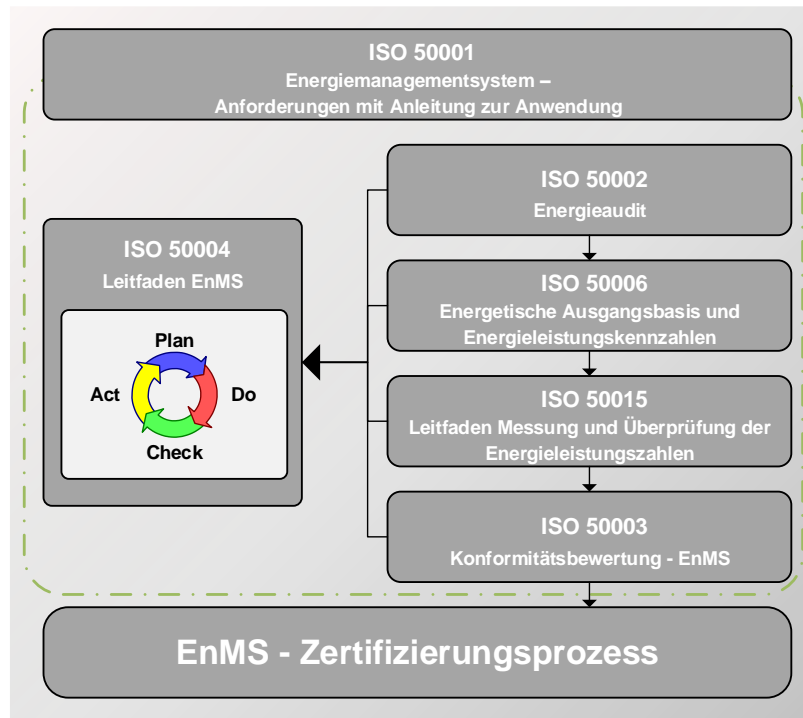


Abb. 2-13: Zusammenwirken der sich ergänzenden Standards der ISO 50000-Familie⁸⁷

Ein wesentliches Ziel der Standardisierung ist die Schaffung vergleichbarer Energiekennzahlen. Dazu sind die Definition eines Bezugszeitraums und die darüber ermittelte energiebezogene Leistung erforderlich. Dies stellt die Festlegung der energetischen Ausgangsbasis (EnB) sicher aus denen sich Energieleistungskennzahlen ableiten lassen, mit denen die strategischen und operativen Energieziele abgeleitet und überprüft werden können. Die Beziehung zwischen diesen Energiegrößen sind in Abb. 2-14 dargestellt.

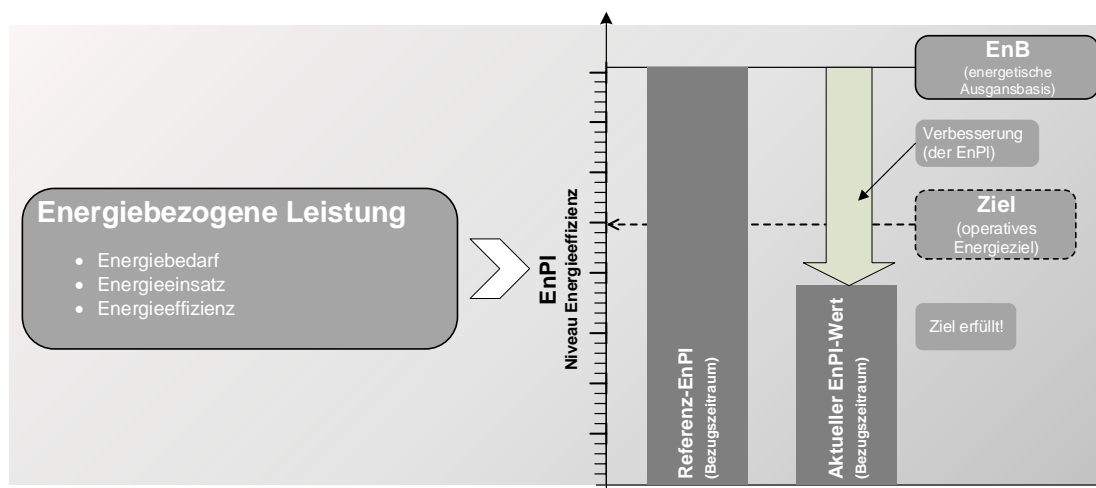


Abb. 2-14: Beziehung zwischen der energiebezogenen Leistung, EnPIs (Energieleistungskennzahlen), EnBs und operativen Energiezielen⁸⁸

⁸⁷ Eigene Darstellung. Vgl. Girbig 2017, S. 420.

⁸⁸ Eigene Darstellung. Vgl. DIN ISO 50006, S. 5.

2.3 Zusammenfassung

Aus dem vorgestellten Stand des Wissens in der Theorie und der Praxis lässt sich die inhaltliche Ausarbeitung dieser Arbeit einordnen. Die Bauteilreinigung ist durch umfangreiche empirische Untersuchungen durch beteiligten Akteure stetig weiterentwickelt worden. Jedoch zeigt sich, dass die theoretische Aufarbeitung diesem Wissensstand nicht in gleichem Maße folgt. Dieses Ungleichgewicht macht eine Auseinandersetzung mit neuen Herausforderungen, wie sie Unternehmen durch eine veränderte Energiepolitik gerade vorfinden, sehr schwierig.

Diese Dissertation stellt erstmals eine Verbindung her, zwischen grundlagenbasierter Analyse der Reinigungsverfahren und dessen Wirkzusammenhänge der Lösungsmechanismen von Verunreinigung und Bauteil. Die Erweiterung der Energiebilanz auf thermodynamische Prinzipien ermöglicht eine vollständige Analyse einer Reinigungsanlage zur Ableitung wesentlicher Energieeffizienzkennzahlen. Anhand der ausführlichen Bewertung dieser Energieeffizienzkennzahlen sind Hersteller und Nutzer von Reinigungsanlagen in der Lage im Sinne von standardisierten EnMS zu handeln. Eine Übersicht und Einordnung bisheriger Forschungsansätze und die inhaltliche Einordnung dieser Arbeit gibt Tab. 2-2 wieder.

Tab. 2-2: Übersicht der bisherigen Forschungsansätze und Einordnung der vorliegenden Arbeit

<div><div><div></div><div>Berücksichtigt/ Zutreffend</div></div><div><div></div><div>Teilweise berücksichtigt/ Zutreffend</div></div><div><div></div><div>Nicht berücksichtigt/ Zutreffend</div></div></div>											
		(Wullstein 2004)	(Kloke 2003)	(Schrems 2014)	(Li und Kara 2011)	(Dahmus und Gutowski 2004)	(Gleich 2008)	(Eisele 2014)	(Kuhre 2011)	Junge	
Energiebilanz	Energiebedarf von Maschinen	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
	Energieeffizienzaussage	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
	Energiekennzahlen	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
Reinigungsverfahren	Auslegung	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
	Verunreinigungsanalyse	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
	Lösungsmechanismen	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
	Technische Sauberkeit	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
Thermodynamische Analyse	Wärmetransport	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
	Chemisches Potenzial	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	
	Exergetische Bilanz	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	<div></div>	

3 Bewertungssystematik für die Energieeffizienz von Produktionsanlagen

Nicht erst seit der von der Bundesregierung auch politisch initiierten Energiewende ist es für die verschiedenen Akteure in diesem Kontext sehr schwer die mannigfaltigen Ansätze für Energieeffizienzbewertungen richtig zu verstehen und zu verwenden. Folgt man allein der Terminologie in den einzelnen Forschungsdisziplinen der unterschiedlichen Energieformen (Elektrotechnik, Thermodynamik, Kontinuumsmechanik, chemische Verfahrenstechnik), so ergeben sich für die Begriffe Energie oder auch Energieeffizienz viele unterschiedliche Definitionen und Formalien. Versucht man diese Bandbreite in die wirtschaftswissenschaftlichen Disziplinen, den Industriesektor, die Politik oder in allgemeine, fachfremde Gesellschaftsgruppen zu transferieren, gehen der Überblick, die Bedeutung und die begriffliche Einheit gänzlich verloren. Da die vorliegende Arbeit in all den genannten Forschungsbereichen angesiedelt ist und die Ergebnisse einen Transfer liefern sollen, um auch außerhalb des universitären Formalismus Anwendung zu finden, sind im Vorfeld Erläuterungen von grundlegenden methodischen Unterscheidungsmerkmalen für Energieeffizienzbewertungen notwendig, um die in dieser Arbeit entwickelte Bewertungssystematik zu beschreiben.

Im folgenden Kapitel soll die Bewertungssystematik für die Energieeffizienz von Produktionsanlagen, wie sie in dieser Arbeit in den Kapiteln 4-7 Anwendung findet, erläutert werden. Dazu werden

- Methodische Unterscheidungsmerkmale skizziert,
- die Grundlage der Bewertungsmethode mittels Minimum Value Calculation eingeführt und
- die einzelnen Anwendergruppen und deren Motivation von Energieeffizienzbewertungen erläutert.

Zu Beginn ist es erforderlich die Forschungskonzeption zu erläutern. Darin werden die wesentlichen Forschungsziele definiert und sowohl die inhaltlichen als formalen Anforderungen an die Bewertungssystematik beschrieben.

3.1 Forschungskonzeption

Aus der in der Einleitung erläuterten Motivation und den bisherigen Wissensstand heraus soll in diesem Kapitel das Forschungskonzept beschrieben werden, das dieser Arbeit zu Grund liegt. Dabei werden zunächst die Forschungsziele abgeleitet und die Anforderungen an eine Bewertungssystematik zur Energieeffizienz von wässrigen Bauteilreinigungsanlagen formuliert.

3.1.1 Ableitung von Forschungszielen und Anforderung an die Bewertungssystematik

Die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind Akteure im Bereich der wässrigen Bauteilreinigung in immer größerem Maße motiviert, die energetischen Abläufe der Verfahrens- und Anlagentechnik genau zu analysieren. Gleichzeitig stehen derzeit keine

Instrumente zur Verfügung die Komplexität zur Bewertung der Energieeffizienz von Bauteilreinigungsanlagen hinreichend zu erfassen und zu analysieren. Das erste Forschungsziel der Arbeit kann somit formuliert werden:

I. Entwicklung einer Energieeffizienzbewertung von wässrigen Bauteilreinigungsanlagen im Bereich der metallverarbeitenden Industrie.

Durch den mehrdimensionalen Charakter von Energiebilanzen und der gewünschten Anwendung auf ökonomische Handlungsbereiche ergeben sich hieraus besondere Anforderungen an eine Systematik der Energieeffizienzbewertung. Die vielfältige terminologische Nutzung von Energiebilanzen und –bewertungen gilt es zu würdigen. Hieraus soll das zweite Forschungsziel lauten:

II. Dem Nutzer der Energieeffizienzbewertung soll ein Hilfsmittel zur Verfügung stehen, den technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Anforderungen seines energetischen Verhaltens gerecht zu werden.

Die erarbeitenden Bewertungen sollen allen Akteuren, das heißt, Hersteller und Nutzer von Reinigungsverfahren und –anlagen, eine Kommunikations- und Handlungsgrundlage liefern, die auf wissenschaftlich fundierten und transparenten Formalien beruht.

3.1.2 Inhaltliche Anforderungen

Aus den Analysen und Untersuchungen bisheriger durchgeführter und veröffentlichter Studien können vier Grundsätze abgeleitet werden, die für alle Bewertungen im Bereich des Ressourceneinsatzes in industriellen Produktionsbetrieben und damit auch für die Bewertung der Energieeffizienz von Bauteilreinigungssystemen gelten. Inhaltlich eine Bewertung der Effizienz im energiewirtschaftlichen Kontext folgende Anforderungen erfüllen:⁸⁹

1. Das Bewertungskonzept sollte **zweckmäßig** sein.
2. Die Identifikation methodischer Unterscheidungsmerkmale muss für **Transparenz der Bewertungslogik** sorgen.
3. Bei einer monetären Bewertung müssen die **betriebs- oder gesamtwirtschaftlichen Perspektiven** begründet werden sowie die dafür herangezogen Preise und Preisfestsetzungen angegeben werden.
4. Eine **Bilanzierung der aufwandsseitig genutzten Ressourcen** sollte möglichst umfassend sein. Dies verringert mögliche Substitutionseffekte nicht erfasster Ressourcen.

Miller fasst darüber hinaus noch zwei weitere Empfehlungen zusammen, die sich aber auf volkswirtschaftliche und politische Perspektiven beziehen, die im Rahmen von Energieeffizienzbewertungen einzelner Produktionsanlagen und –verfahren nicht praktikabel erscheinen. Diese vier Grundsätze gelten für alle Bewertungen im Bereich des Ressourceneinsatzes

⁸⁹ Vgl. Miller et al. 2016, 122f.

in industriellen Produktionsbetrieben und damit auch für die Bewertung der Energieeffizienz von Bauteilreinigungssystemen. Aus diesen Abhandlungen ergeben sich die weiteren Forschungsziele:

- III.** Die Bewertung stellt Instrumente bereit, die der **Komplexität der Thematik** gerecht werden und dabei für eine **reproduzierbare und transparente Ergebnisdarstellung** sorgen.
- IV.** Um eine praxisnahe Anwendbarkeit der Methodik sicherzustellen, wird auf eine **hohe Praktikabilität der Methodik auch für unerfahrene Anwender** geachtet. Die Datenerhebung zur Effizienzbewertung muss mit möglichst wenig Aufwand verbunden sein. Der Raum für Interpretationen der Bewertungsgrundlage ist möglichst gering zu halten.
- V.** Durch eine **quantifizierte Energieeffizienzbewertung einzelner technologischer und verfahrenstechnischer Alternativen** soll eine Priorisierung der Handlungsfelder ermöglicht werden. Dadurch wird dem Umstand Rechnung getragen, dass Unternehmen nur begrenzte Ressourcen für eine themenfokussierte Optimierung von Anlagen und Verfahren

3.1.3 Formale Anforderungen

Neben den inhaltlichen Anforderungen an die zu entwickelnde Bewertung werden folgende Grundanforderungen an die wissenschaftliche Fundiertheit der methodischen Erarbeitung gestellt:⁹⁰

1. Die Bewertungsmethode liefert Erklärungen.
Die Bewertung fußt auf phänomenologischen Prinzipien und gibt Antwort auf Fragen nach dem „Warum?“.
2. Die Bewertungsmethode liefert Prognosen.
Auf Basis der Erklärungen können Aussagen über die zukünftige Entwicklung des untersuchten Phänomens getroffen werden.
3. Aufgrund der Bewertungsmethode sind Maßnahmeninterventionen möglich.
Unter Interventionen werden Maßnahmen verstanden, die die Realität beeinflussen und verändern können.

Nach Kuske sollten diese Anforderungen um zwei formale Gestaltungsaspekte erweitert werden:

4. Die Bewertungsmethode ist empirisch überprüfbar.
Die durch die Bewertungen ableitbaren Aussagen und Empfehlungen müssen intersubjektiv, das heißt, unabhängig von den Sichtweisen, Wünschen oder Ideologien des Betrachters

⁹⁰ Vgl. Kuske 2013, 35f zitiert nach Hunt 2005, 127f.

– überprüfbar sein. Überprüft werden die Aussagen der Bewertung hinsichtlich ihrer Richtigkeit in der Realität.

5. Die Bewertungen sind reproduzierbar.

Unter Reproduzierbarkeit wird verstanden, dass die Bewertungen zuverlässig wiederholbar sind. Dies schließt explizit die Verwendung einer Befragungstechnik für die Ermittlung von wesentlichen Daten für die Bewertung aus.

3.2 Methodische Unterscheidungsmerkmale von Energieeffizienzbewertungen

In der Literatur⁹¹ sind für den energiewirtschaftlichen Sektor methodische Unterscheidungsmerkmale beschrieben, die unabhängig vom Anwendungsobjekt immer bei einer Energieeffizienzbewertung ermittelt bzw. festgelegt werden müssen. Der Bezug auf einen energiewirtschaftlichen Kontext ist dabei als Deklaration für einen kostenbewertenden Ansatz zu verstehen, der sich aber nicht einer phänomenologischen Erweiterung widersetzt. Dies wird in der Erweiterung der Bewertungssystematik durch entsprechende Berechnungsmethoden für Energiekennzahlen im Kapitel 3.3 näher beschrieben.

Damit eine methodische Energieeffizienzbewertung aussagekräftige Ergebnisse liefert und den in Abschnitt 3.1.1 aufgeführten Anforderungen entspricht, müssen drei Fragen beantwortet werden:⁹²

1. Was wird untersucht?
2. Welche Aussage soll die Untersuchung liefern?
3. Auf welche Art und Weise kann ermittelt werden?

Hinter diesen Fragenstellungen sind die drei wesentlichen Unterscheidungsmerkmale zusammengefasst, s. linke Seite in Abb. 3-1, die in folgenden Abschnitten erläutert und definiert werden:

- Untersuchungsgegenstand
- Festlegung der Aussageart
- Definition des Bewertungsraums

⁹¹ S. Miller et al. 2016; Blesl und Kessler 2017, S. 10; Pehnt 2010; Thiede 2012.

⁹² S. Miller et al. 2016, 109f.

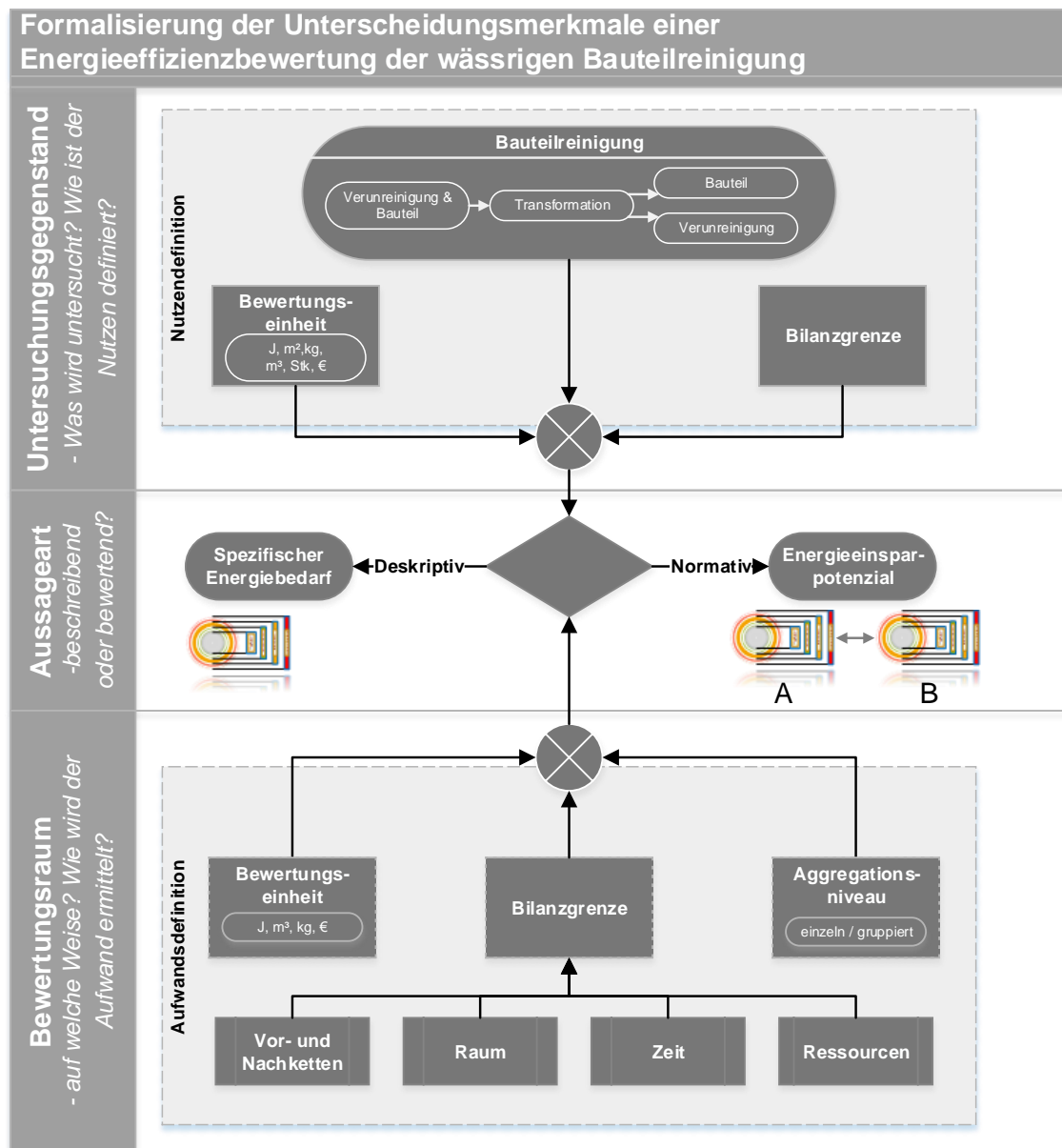


Abb. 3-1 Formalisierung der Unterscheidungsmerkmale für eine Energieeffizienzbewertung von Bauteilreinigungsanlagen⁹³

Als Basis der Bewertungssystematik sei folgende Definition vorausgesetzt:⁹⁴

$$\text{Effizienz} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\text{Erreichter Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad (3-1)$$

Als Prozessgröße beschreibt die Effizienz somit, womit ein gewünschtes bzw. definiertes Ergebnis erreicht wurde.⁹⁵ Dieser Bewertung folgend können abgrenzende bzw. weiterführende Definitionen zwischen Energieeffizienz, rationeller Energieanwendung und Energieeffizienz

⁹³ Eigene Darstellung. Vgl. Miller et al. 2016, 109f.

⁹⁴ S. Pehnt 2010, S. 2.

⁹⁵ Vgl. Miller et al. 2016, S. 107. Abzugrenzen ist von der Effizienz die Effektivität, die einen erreichten Nutzen mit dem angestrebten Nutzen vergleicht und somit eine Aussage über den Zielerreichungsgrad trifft.

vs. Energieeinsparung getroffen werden. Die Inverse der Effizienz aus (3-1) wird als Intensität bezeichnet.

3.2.1 Definition des Untersuchungsgegenstands

Damit eine Auseinandersetzung mit der Energieeffizienz eines Systems erfolgen kann, muss zu Beginn der Untersuchungsgegenstand und damit der Nutzen der Energieeffizienzbewertung definiert werden. Eine genaue Definition erfolgt über die Festlegungen einer Systemgrenze und einer Bewertungseinheit, wodurch der erreichte Nutzen quantifiziert wird.

Für die Bauteilreinigung als produktionstechnisches Verfahren gilt die Zielstellung, die Oberfläche zu fertigender Einheiten (Bauteile, Werkstücke etc.) nach bestimmten Kriterien zu transformieren. Diese Kriterien werden zumeist mittels einer technischen Sauberkeit formalisiert⁹⁶. Soll diese Transformation energetisch bilanziert werden, ist als Nutzendefinition die Produktionseinheit sinnvoll. Die Bewertungseinheiten können anwendungsspezifisch sehr verschiedenen sein. Hier eignen sich Stückzahl, Oberfläche, Volumen, Gewicht oder auch Kosten. Diese unterscheiden sich jeweils nur über Umrechnungsfaktoren oder lineare Aggregationseinheiten. Des Weiteren kann die energetische Transformation über die Untersuchung der Verunreinigung bilanziert werden. Auch hier können wieder verschiedene Bewertungseinheiten, wie Anzahl, Gewicht oder Volumen geeignet sein, um den erreichten Nutzen zu formalisieren.

In dieser Arbeit soll ein zusätzlicher Ansatz verfolgt werden, der die energetischen Verbindungen von Werkstück und Verunreinigung analysiert. Der erreichte Nutzen ist die Überwindung der flächenbezogenen Bindungsenergie zwischen Produktionseinheit und der auftretender Verunreinigung. Als Bewertungseinheit ist hierbei die Energie maßgeblich. Die Bestimmung der Bindungsenergien von Verunreinigungen und der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren, ist in Kapitel 4 beschrieben.

3.2.2 Festlegung der Aussageart

Die Bewertung der Energieeffizienz kann über zwei unterschiedliche Ausrichtungen der Aussage erfolgen: eine deskriptive oder normative Bewertung. Eine deskriptive Bewertung ist beschreibend und gibt als Aussage eine direkte Nutzen-Aufwand-Relation an⁹⁷. Als Beispiel können hier der Wirkungsgrad eines Motors⁹⁸ oder die Güte der elektrischen Energiebereitstellung eines Kraftwerks im Verhältnis zu seiner Brennstoffenergie⁹⁹ genannt werden.

Normative Aussagen stellen Vergleiche zwischen deskriptiven Aussagen bzw. Bewertungen an. Dabei können Sollvorgaben, Vergleichsprozesse oder auch Referenzmaschinen u.v.m. als Basis der Bewertung dienen. Dadurch eignen sich normative Energieeffizienzbewertungen sehr gut als Steuerungskennzahlen und zur Überwachung von Prozessen. Ein prototypisches Beispiel für eine normative Energieeffizienzbewertung ist die Zuweisung des Energiebedarfs

⁹⁶ Welche Kriterien heran gezogen werden und wie die technische Sauberkeit definiert ist, wird in Unterkapitel 4.2 erläutert.

⁹⁷ Vgl. Miller et al. 2016, S. 110.

⁹⁸ $\eta_{Motor} = (\text{mechanische Leistung}) / (\text{elektrische Leistung})$

⁹⁹ S. Strauss 2016, S. 25.

zu einem Energielabel, wie sie im Bereich von Weißware mittlerweile gesetzlich vorgeschrieben ist¹⁰⁰.

Auch in dieser Arbeit werden zunächst verschiedene deskriptive Bewertungen erstellt, die sich in einzelnen Elementen des Bewertungsraumes unterscheiden und anschließend für normative Aussagen miteinander verglichen werden. Die Elemente des Bewertungsraumes werden im nächsten Abschnitt 3.2.3 beschrieben.

3.2.3 Definition des Bewertungsraumes

Der Bewertungsraum beschreibt auf welche *Art und Weise* der festgelegte Untersuchungsgegenstand bewertet wird¹⁰¹. Drei Kriterien legen fest, zu welchem Bezug der Nutzen (als Untersuchungsgegenstand) gesetzt wird: Bilanzgrenze, Aggregationsniveau und Bewertungseinheit. Der Bewertungsraum formalisiert damit den Aufwand einer Effizienzbewertung.

Bilanzgrenze

Der Untersuchungsgegenstand impliziert zumeist schon den Nutzen als Bewertungsgröße. Die Bilanzgrenze¹⁰² gibt dieser implizierten Bewertung die zeitliche und räumliche Abgrenzung. Im Falle des Produktionsverfahrens „wässrige Bauteilreinigung“ wird als Nutzengröße „Produzierte Produkteinheiten mit definierten Eigenschaften“ definiert. Die räumliche Grenze der Bilanz kann die Fabrik als Standort der Reinigungsanlage (D), die Reinigungsmaschine selbst (C), die Reinigungskammer (B) oder auch die Werkstückoberfläche (A) mit ein- und austretenden Stoff- und Energieströmen sein, s Abb. 3-2. Damit gehen die Ermittlung und die Analyse der innerhalb dieser Grenze auftretenden Energieumwandlungen und Transformationsprozesse¹⁰³ einher. Die räumliche Anpassung der Bilanzgrenze ermöglicht dabei die Vereinfachung der Modellbildung zur Berechnung von Energietermen und Prozessgrößen. Neben der räumlichen Dimension enthält die Bilanzgrenze auch den zeitlichen Rahmen über dem der Untersuchungsgegenstand betrachtet wird. Der kürzeste Zeitraum umfasst dabei gerade einen Transformationsprozess. Der längste Zeitraum bezieht sich hingegen auf die zu vergleichenden Jahresverläufe der Energieaufwände. Eine zeitliche Randbedingung ist weder eine notwendige noch hinreichende Bedingung für eine energetische Bilanzierung oder Bewertung, da auch der Vergleich zweier Energiezustände im jeweiligen thermodynamischen Gleichgewicht¹⁰⁴ ebenfalls eine relevante Effizienzbetrachtung erlaubt.

¹⁰⁰ S. Europäisches Parlament und Rat 04.07.2017.

¹⁰¹ Vgl. Miller et al. 2016, S. 110.

¹⁰² Häufig wird bei der Bewertung der Energieeffizienz auch der Begriff «Systemgrenze» genannt. Allerdings ist dieser stark durch die Verwendung in der Thermodynamik und der Modellbildung im Kontext der Wissenschaftstheorie behaftet und soll damit auch nur mit dieser Bedeutung in dieser Arbeit Verwendung finden.

¹⁰³ Transformationsprozess meint in diesem Sinn, die gewünschte Bearbeitung und Veränderung der Bauteile mit dem gewählten Fertigungsverfahren.

¹⁰⁴ Prozessdauer $t \rightarrow \infty$

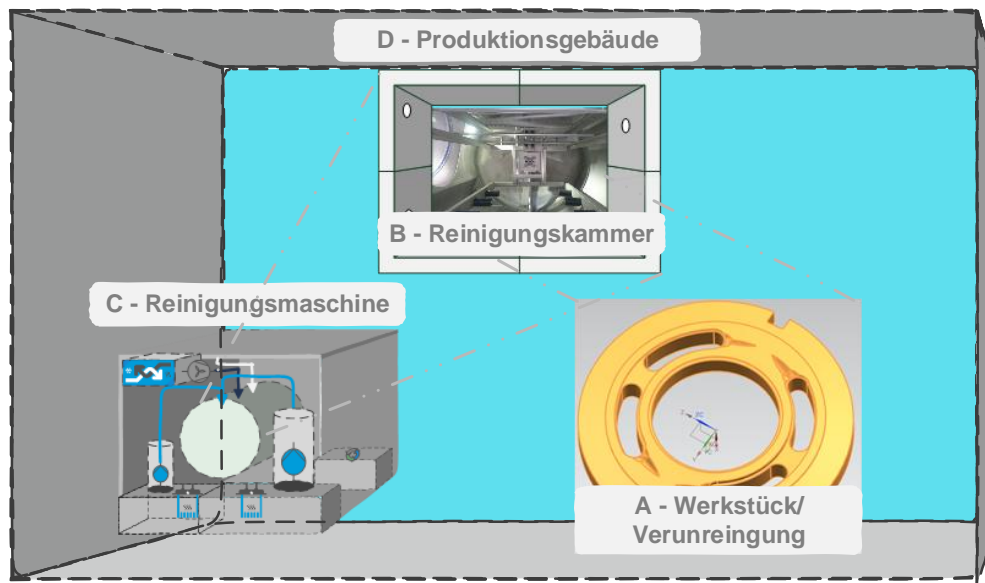


Abb. 3-2: Verschiedene geeignete Bilanzräume (A-D) für die Bewertung der Energieeffizienz der Bauteilreinigung¹⁰⁵

Um eine zielgerichtete Bilanzgrenze zu definieren, die zum einen den gewünschten Informationsgehalt besitzt und zum anderen einen angemessenen Grad an Komplexität aufweist, sind zwei Differenzierungsmerkmale zu berücksichtigen: *Ressourcen* – die in die Bewertung einfließen – und *Vor- und Nachbehandlung* – die berücksichtigt werden.

Bei der wässrigen Bauteilreinigung umfassen die Ressourcen die Energieträger

- Wasser,
- Reinigungschemie,
- Druckluft,
- Luft,
- Bauteilmasse,
- elektrische Energie und
- thermische Energie bei alternativen Beheizungsarten.

Für einzelne Bewertungen können Ressourcen vom Bilanzraum unberücksichtigt bleiben, die am jeweiligen Transformationsprozess nicht beteiligt sind, für die keine betragsmäßigen Änderungen vorliegen oder keine Umwandlungen in andere Energieformen auftreten.

Die zu berücksichtigenden Vor- und Nachketten schließen die bereits vorliegenden oder noch benötigten Transformationen in die Bilanz mit ein. Beim wässrigen Reinigen ist dies unter anderem der Trocknungsvorgang nach dem Reinigen. Auch Peripherievorgänge zur dauerhaften Verwendung einer Reinigungsmaschine in einer Produktion¹⁰⁶ müssen im Falle einer Bilanzgrenze (C) in Abb. 3-2 mit einbezogen und dem Nutzen der gereinigten Bauteile gegenübergestellt werden. Die Vor- und Nachketten der Transformation besitzen somit zwei Dimensionen:

¹⁰⁵ Eigene Darstellung.

¹⁰⁶ Hier seien Vorgänge zur Pflege der Reinigungsmedien als Beispiel genannt.

- Zeitliche Dimension: gesamte Aufbereitung und Nachbereitung der oben erfassten Energieträger bei einer dynamischer Änderung (im Zweifel einzugrenzen auf energetisch zu erfassende bzw. relevante Vorgänge)
- Räumliche Dimension: Anlage des Reinigungsvorgangs und dessen energetischen Wechselwirkungsbereich mit der Festlegung einer Bilanzgrenze (darüber hinaus sind zentrale Energiedienstleistungsanlagen zu bilanzieren)

Aggregationsniveau

Über das Aggregationsniveau können aufwandseitig Ressourcen einzeln oder gruppiert in die Effizienzbewertung eingehen. Die Gruppierung, also eine Zusammenfassung der Ressourcen, kann nur erfolgen, wenn die gleiche Bewertungseinheit vorliegt oder die Ressourcen die gleiche Wirkungsweise besitzen. Im Falle der Bauteilreinigung kann hier der Vergleich vom Einsatz unterschiedlicher waschaktiver Zusatzstoffe und deren Schädigungspotenzial für die Umwelt betrachtet werden. Dabei gelten für unterschiedliche Stoffe verschiedene Grenzwerte, die aggregiert in eine Bewertung einfließen können.

Eine übliche Aggregation stellt die Ermittlung von Erlösen bzw. Kosten dar. Hierzu können alle eingesetzten Ressourcen in Form von Marktpreisen aggregiert werden und so eine Effizienzbewertung durchgeführt werden. Dies ist besonders zur Berücksichtigung und Bewertung der chemischen Energie im Vergleich zu anderen Energieformen bei der Reinigung sinnvoll.

Bewertungseinheit

Bleiben volkswirtschaftliche Perspektiven außer Acht, stehen monetäre und physikalisch-thermodynamische Bewertungseinheiten zur Verfügung, um Nutzen und Aufwand zu quantifizieren. Diese müssen auch nicht die gleiche Einheit für eine Bewertung besitzen. Für eine normative Bewertung können fast alle Bewertungseinheiten für eine Nutzen-Aufwand-Relation gewählt werden, wobei diese zweckmäßig sein sollten. In Abb. 3-1 sind sowohl nutzen- als auch aufwandsseitig mögliche Bewertungseinheiten angegeben.

3.3 Minimum Value Calculation Methode

Anhand der oben genannten Unterscheidungsmerkmale, die für jedwede Energieeffizienzbewertung getroffen werden können, soll nun die Methode der Minimum Value Calculation (MVC) erläutert werden. Grundlage bildet die schrittweise Änderung der Bilanzgrenze, wie es bereits in Abschnitt 3.2.3 skizziert wurde. Ziel dieser Berechnungsmethode ist die Ermittlung des minimalen energetischen Zustands für eine zu erzielende Systemtransformation. Schrittweise bedeutet hier, dass der Bewertungsraum jeweils um Einflussgrößen erweitert und neu bilanziert wird. Jede neue Bilanzierung umfasst die in der Bilanz zuvor ermittelten Energiegrößen. Werden die einzelnen Energiebilanzen jeweils zueinander in Relation gesetzt, kann daraus der energetische Effizienzcharakter der Transformation abgelesen werden. Damit können Informationen darüber gewonnen werden, welche Energieumwandlungen welche Trans-

formationsschritte benötigen. Die Herangehensweise der schrittweisen Beurteilung der Energiewandlungsvorgänge findet sich unter der in der Literatur beschriebenen Energieeffizienzlücke¹⁰⁷. Hier werden die verschiedenen Potenziale für Energieeffizienzsteigerungen auf technische und ökonomische Hemmnisse zurückgeführt¹⁰⁸. Die Ansätze zur Beschreibung der noch vorhandenen Potenziale haben jedoch den Nachteil, dass die Bezugsbasis oft nicht klar definiert ist. Diese fehlende Bezugsbasis ist für eine interne Verwendung von Energieeffizienzbewertungen als Handlungsempfehlung schwierig zu deuten und macht Vergleiche von Energieeffizienzaussagen nahezu unmöglich. Diese Intransparenz in den Randbedingungen für eine normative Energieeffizienzbewertung löst die MVC-Methode durch ihre präzise Berechnungsvorschrift, die besagt, dass die geringste mögliche Energiemenge für die untersuchten Transformationen zu ermitteln ist.

Wird bildlich jede einzelne Bilanz als Schale aufgefasst, entsteht dabei ein Schalenmodell, wie es in Abb. 3-3 dargestellt ist.

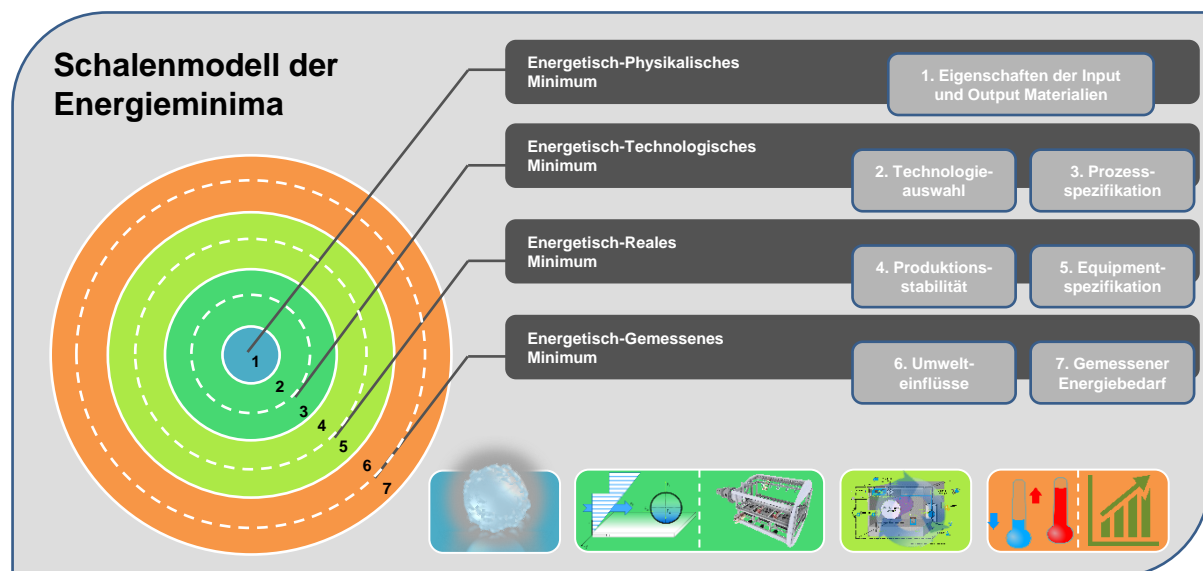


Abb. 3-3: Schalenmodell der unterschiedlichen Energieaufwandbezugsniveaus¹⁰⁹

Für eine umfassende Analyse der energetischen Abläufe und deren Bewertung hinsichtlich der Energieeffizienz wurde ein Modell mit sieben Schalen entwickelt¹¹⁰. Die einzelnen Bewertungskriterien (Schalen) sind so definiert, dass sie für alle energierelevanten Prozesse anwendbar sind. Als erste Bilanz und im Kern des Schalenmodells wird das energetisch-physikalische Minimum ermittelt. Dieses Minimum beschreibt den energetischen Zustand der In- und Output-Materialien (1). Dieser Zustand wird in der zweiten Schale um die zu bilanzierenden energetischen Bedarfe der gewählten Technologie (2) und die Prozessspezifikationen (3) erweitert. Werden diese Prozessspezifikationen für eine stabile Produktion umgesetzt, müssen zusätzliche Peripherievorgänge (4) und Komponentenverluste (5) in der energetischen Bilanz berücksichtigt werden und bilden das energetisch-reale Minimum. Die vollständige Bewertung die-

¹⁰⁷ Vgl. *energy-efficiency gap* bei Jaffe und Stavins 1994, S. 808.

¹⁰⁸ S. Schmid 2004; Eisele 2014.

¹⁰⁹ Eigene Darstellung. Vgl. Kreitlein et al. 2015.

¹¹⁰ Vgl. Kreitlein et al. 2015.

ses Systems erfolgt unter zu bilanzierenden Umwelteinflüssen (6) auf der Grundlage von Daten aus Messsystemen (7), die den vollumfänglichen Energiebedarf abbilden. Tab. 3-1 listet die genannten Schalen bzw. Bewertungskriterien auf und ordnet diese den Minima zu. Daneben wird die analytische Beschreibung der *energy efficiency values* (EEV) genannt.

Die Anwendung und genaue Erläuterung der einzelnen energetischen Minima für die wässrige Bauteilreinigung erfolgt in den nächsten Abschnitten.

Tab. 3-1: Auflistung der Schalenbezeichnung und der Bilanzierungsbeziehungen in der Effizienzbewertung

Schale	Beschreibung	Bezeichnung des energetischen Minimums	Abk.	Effizienzbewertung
1 Eigenschaften der Input/Output Materialien	Beschreibung der energetischen Transformation	Physikalisch	EPM	$EEV_p = \frac{EPM}{EBM}$
2 Technologieauswahl	Art der verrichteten Arbeit	Technologisch	ETM	$EEV_T = \frac{ETM}{EBM}$
3 Prozessspezifikation	Bereitstellung der benötigten Energie			
4 Produktionsstabilität	Energiebedarf für Peripherieequipment	Real	ERM	$EEV_R = \frac{ERM}{EBM}$
5 Equipment- und Komponentenspezifikation	Verluste der Anlage und Geräte			
6 Umwelteinflüsse	Energetisch relevante Störfaktoren	Gemessen	EBM	/
7 Gemessener Energiebedarf				

3.3.1 Energetisch-Physikalisches Minimum der Bauteilreinigung

Das Energetisch-Physikalische Minimum (EPM)¹¹¹ beschreibt mittels chemischer oder physikalischer Gesetzen, wie viel Energie benötigt wird, um eine beabsichtigte Transformation durch eine definierte Operation auf oder in einem betrachteten Objekt durchzuführen. Das physikalische Minimum bestimmt sich auf der Grundlage der energetischen Spezifikationen des Eingangs- und Ausgangsmaterials ($E_{m\ i}$). Soll das energetisch-physikalische Minimum bei einer industriellen Reinigung ermittelt werden und somit die Charakterisierung der In- und Output-Materialien erfolgen, so erfolgt dies über eine Analyse der Verbindung von Verunreinigung und Bauteil. Diese physikalischen und/oder chemischen Verbindungen müssen im Reinigungsverfahren transformiert bzw. gelöst werden. Formal beschreiben lässt sich dieses Minimum mit Gleichung (3-2).

$$EPM = \sum_{i=1}^n E_{m\ i} \quad (3-2)$$

mit

$E_{m\ i}$: Energietherme der Input/Output-Spezifikationen der Materialien

i, n : Zählvariable i bis zur Anzahl n der Energieterme

¹¹¹ S. Kreitlein et al. 2015, 153f.

Die Energietherme beschreiben somit das Vorhandensein von chemisch/physikalischen Bindungen von unerwünschten Phasen¹¹² auf einer Oberfläche (Input-Spezifikationen), die im Prozess gelöst werden müssen, um diese Phasen definiert zu entfernen (Output-Spezifikation). Die Verbindungsenergie zwischen diesen Phasen stellt betragsmäßig den minimalen energetischen Bedarf dar, der für ein gewünschtes Reinigungsergebnis aufgewendet werden muss. Wird dieser ins Verhältnis zum tatsächlichen gemessenen Energiebedarf gesetzt, so ergibt dies die physikalische Energieeffizienz EEV_p , Gleichung (3-3).

$$EEV_p = \frac{EPM}{EBM} \quad (3-3)$$

3.3.2 Energetisch-Technologisches Minimum

Wenn die physikalische und chemische Grundstruktur des Systems modelliert ist, kann die Technologieauswahl getroffen werden, um die gewünschten energetischen Transformationen durchzuführen. Dabei beschreibt das energetisch-technologische Minimum (ETM) den Energiebedarf, der minimal benötigt wird, um eine grundlegende Arbeit durch eine Technologie zu verrichten¹¹³. Im ETM werden die zu Grunde liegenden Prozessspezifikationen berücksichtigt. Zur Berechnung des Minimalwerts, Gleichung (3-4), sind die technologischen Spezifikationen (E_{ti}) in Bezug auf den minimalen Energiebedarf erforderlich. Für die Durchführung einer Basisoperation können verschiedene Technologien berücksichtigt werden. Im Falle von fluiden bzw. filmischen Verunreinigungen, s. Abschnitt 4.1.2, können dies chemische Lösungstransformation (Lösemittelreinigung), Sublimationstransformation (Laserreinigung) oder andere sein¹¹⁴.

$$ETM = EPM + \sum_{i=1}^n E_{ti} \quad (3-4)$$

mit

E_{ti} : Energietherme der technologischen und prozessualen Spezifikationen

i, n : Zählvariable i bis zur Anzahl n der Energieterme

Da die ausgewählte Technologie bereits Randbedingungen vorgibt, wie die Transformation verrichtet wird, sind im ETM die energetischen Spezifikationen des Prozesses einbezogen. Im untersuchten Fall dieser Arbeit, der wässrigen Bauteilreinigung, umfasst das ETM die fluid-dynamischen Vorgänge zum Lösen und Transportieren von Festpartikeln und Fluidphasen auf wässriger Basis. Die Prozessspezifikationen umfassen dabei eine kinematische Energietransformation in einer Reinigungskammer und ein chemisches Energiepotenzial als gelöste

¹¹² „Allgemein ist [...] der Begriff Phase als Teilbereich eines Systems zu definieren, an dessen Grenzen sich Dichte, optische Eigenschaften (Brechungsindex) und gegebenenfalls die Struktur (bei Feststoffen) sprunghaft ändern.“; s. Stephan et al. 2010, S. 4 ; Dies ist abzugrenzen, vom thermodynamischen Begriff *Phase*, die eine Stoffkomponente mit stetiger Temperatur, Druck und Dichte definiert.

¹¹³ S. Kreitlein et al. 2015, S. 154.

¹¹⁴ Vgl. DIN 8592.

Mischung durch waschaktive Komponenten. Wird der Quotient aus dem energetisch-technologischen Minimum und dem gemessenen Energiebedarf gebildet, so resultiert die technologische Energieeffizienz, Gleichung (3-5).

$$EEV_T = \frac{ETM}{EBM} \quad (3-5)$$

3.3.3 Energetisch-Reales Minimum

Da es sich im vorliegenden Fall bei der Energieeffizienzbewertung um Produktionsanlagen handelt, müssen neben der technologischen Energiebilanz und der Prozessspezifikation auch die Randbedingungen für den Einsatz in einer Produktion erfasst werden. Die energetische Transformation soll kontinuierlich und stabil immer wieder verrichtet werden. Dadurch müssen Peripherievorgänge ablaufen, die diese Kriterien sicherstellen und energetisch abgebildet werden ($E_{p\ i}$). Für alle Energietransformationen müssen für real implementierte Komponenten und entsprechendes Equipment ($E_{e\ j}$), deren Effizienzverluste bei der Energieumwandlung in die Bilanz einbezogen werden. Für eine wässrige Bauteilreinigungsanlage stellen die Peripherievorgänge unter anderem die dem Reinigungsvorgang nachgelagerte Trocknung und die Kreislaufführung / Aufbereitung der Reinigungsmedien dar. Die Effizienzverluste können bspw. über den Motorwirkungsgrad der Medienpumpe bilanziert werden. Das energetisch-reale Minimum (ERM) ergibt sich somit als Summe des ETM, der minimalen Energiebedarfe für Peripherievorgänge und der Wandlungsverluste des Equipments, Gleichung (3-6).

$$ERM = ETM + \sum_{i=1}^m E_{p\ i} + \sum_{j=1}^n E_{e\ j} \quad (3-6)$$

mit

$E_{p\ i}$: Energietherme der Peripherievorgänge

$E_{e\ j}$: Energietherme der Wandlungsverluste des Equipments

i, m : Zählvariable i bis zur Anzahl m der Energieterme

j, n : Zählvariable j bis zur Anzahl n der Energieterme

Wird das ERM ins Verhältnis zum gemessenen Energiebedarf gestellt, ergibt sich die Energieeffizienz der Produktionsanlage EEV_R , Gleichung (3-7).

$$EEV_R = \frac{ERM}{EBM} \quad (3-7)$$

3.3.4 Gemessener Energiebedarf

Mit dem Ansatz des Minimum Calculation Values ist vor allem die Differenz zwischen dem berechneten energetisch-realen Wert (ERM) und dem tatsächlich gemessenen Energiebedarf (EBM) in der praktischen Produktion interessant. Diese Diskrepanz umfasst vor allem die Umwelteinflüsse, den Faktor Mensch als Nutzer der Anlage und die Messfehler. Die Umwelteinflüsse sind bei der Bauteilreinigung vor allem in der Umgebungstemperatur zu finden, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Wärmetransportvorgänge besitzt. Die in der Formel

(3-7) benannte Energieeffizienz kann auch als maximales Einsparpotenzial für den Energieaufwand betrachtet werden, da der ERM als minimaler Energiebedarf alle operativen Transformationen und Wandlung der Energie bereits beinhaltet, die für das Ausgangsmodell – der Aufhebung der Bindungsenergien – benötigt werden.

Entgegen des veröffentlichten Benchmark-Ansatzes¹¹⁵ wird in dieser Arbeit mit sieben Schalen bzw. Bewertungskriterien gearbeitet. Das zusätzliche Bewertungskriterium *Peripherievorgänge* ist zielführend für eine genaue Energieeffizienzaussage der Reinigungssysteme, da der gemessene Energiebedarf Stillstandszeiten der Anlage erfasst. Auch sind notwendige Komponenten zum Betrieb, wie Filtersysteme, Zusatzpumpen für Schmutzförderung uvm. essentiell für den stabilen Betrieb der Anlage in einer Produktion.

Ebenfalls kann der Handlungsempfehlung des E|Benchmarks aus der Literatur¹¹⁶ nicht vollständig gefolgt werden. In dieser werden für das EPM die Eigenschaften von Material, Geometrie, Zustand, Qualität, und Position der In- und Outputs genannt. Für eine gewünschte Transformation der Eigenschaften muss Energie aufgewendet werden, die durch die Technologie in Form der gewählten Arbeit weiter bestimmt wird. Für eine energetische Bilanzierung der Bauteilreinigung und der Transformation der Oberfläche ist dies nicht hinreichend, da ein wichtiger Energieterm bei der Berechnung des ETM fehlen würde. Abb. 3-4 zeigt dies anhand eines Beispiels.

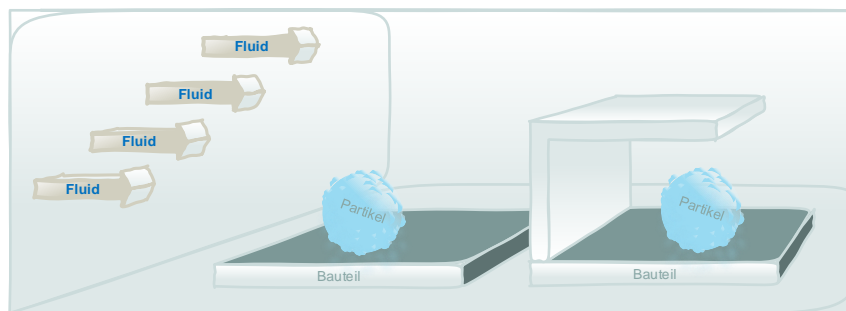


Abb. 3-4: Zwei Bauteile mit einer Verunreinigung; der Partikel auf dem rechten Bauteil kann durch das Totgebiet der Strömung nicht entfernt werden¹¹⁷

Berechnet man für beide Bauteile das EPM, so ergibt sich in der Bindungsenergie keinerlei Unterschied.¹¹⁸ Wird als Technologie für das Lösen und Transportieren des Partikels ein Fluidstrom gewählt, so ergibt sich zwischen den beiden Bauteilen ein erheblicher Unterschied für das ETM, da die sichere Überwindung der Bindungsenergie sehr stark vom vektoriellen Geschwindigkeitsfeld abhängt. Diese Abhängigkeit findet sich nicht beim ETM in der Veröffentlichung wieder. Aus diesem Grund werden im Berechnungsmodell dieser Arbeit notwendige Bauteilcharakteristika auch in die Berechnung des ETM einbezogen, um keine fehlerhaft zu niedrig berechneten Minima zu erhalten.

¹¹⁵ Vgl. Kreitlein et al. 2015 In der Quelle wird darauf hingewiesen, dass sich systemabhängig einzelne Energietransformationen oder –wandlungen in andere als der genannten Kriterien/Schalen bilanzieren lassen.

¹¹⁶ S. Kreitlein et al. 2015, S. 154.

¹¹⁷ Eigene Darstellung.

¹¹⁸ Es werden zwei identische Oberflächen und Verunreinigungen angenommen.

3.4 Anwendergruppen der Energieeffizienzbewertungen

Energieeffizienzbewertungen werden vor allem genutzt, um Energiebedarfe und deren Kosten zu analysieren und zu optimieren. Im Bereich der metallverarbeitenden Industrie ist dies durch die Nutzer von Reinigungsanlagen zur Herstellung von Bauteilen von großem Interesse, da ein hoher Prozentsatz der Betriebskosten auf die Energiekosten entfallen, s. Kapitel 2.2. Dadurch steigt der Anspruch an den Reinigungsmaschinenhersteller, entsprechende Energieeffizienzaussagen ihrer entwickelten Maschine angeben zu können. Dabei treten verschiedene Nutzergruppen einer Energieeffizienzbewertung sowohl beim Anwender der Maschine als auch beim Hersteller auf, die jeweils eigene Aussagen für ihre Entscheidungsfindung oder Verhalten benötigen. In Abb. 3-5 sind diese unterschiedlichen Nutzergruppen dargestellt.

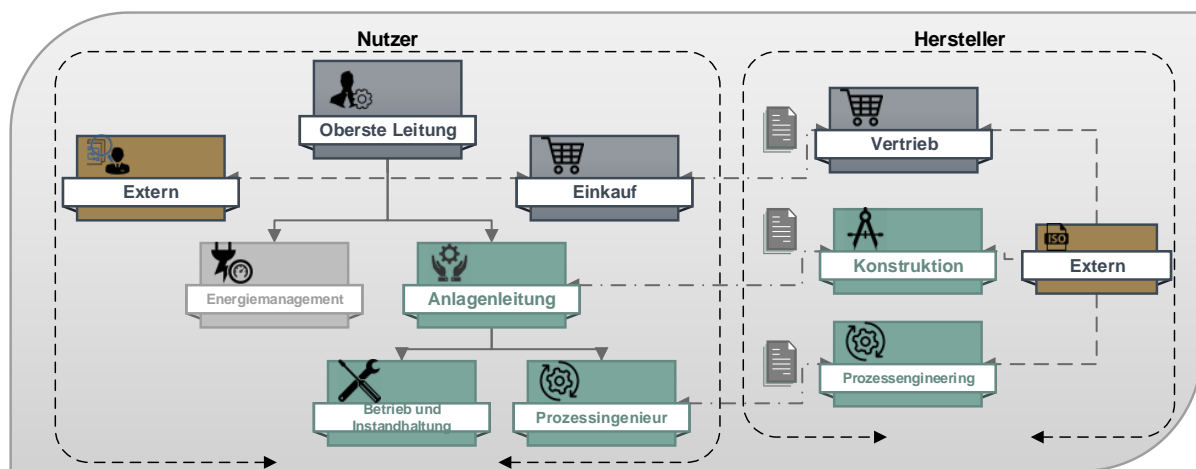


Abb. 3-5: Übersicht der verschiedenen Nutzergruppen von Energieeffizienzbewertungen einer Produktionsanlage¹¹⁹

3.4.1 Nutzer der Reinigungsanlagen

Ein Unternehmen, das eine Reinigungsanlage betreibt, besitzt eine Vielzahl von unterschiedlichen Nutzergruppen, die Energieeffizienzbewertungen für ihre jeweilige Tätigkeit verwenden bzw. selbst ermitteln müssen. Ist im Unternehmen bereits ein Energiemanagementsystem (EnMS) implementiert, so kann dessen präzise Ausgestaltung verwendet werden¹²⁰. Die in Abb. 3-5 dargestellten Gruppen des Maschinenbetreibers können dabei, wie folgt definiert werden:¹²¹

- Die *Oberste Leitung* legt den grundsätzlichen Rahmen für die Erhebung von Energieeffizienzbewertungen und deren Berichterstattung fest. Die Verantwortlichkeit besteht dabei in der Vorgabe angemessener Kennzahlen, die langfristig erhoben werden, in zukünft-

¹¹⁹ Eigene Darstellung.

¹²⁰ In DIN ISO 50006, S. 21 ist eine Detaillierung für ein unternehmensweites Energiemanagementsystem angegeben. Dabei ist die Erhebung und Berechnung von dort genannten Energieleistungszahlen (EnPIs) auf unterschiedlicher Hierarchieebene vorgestellt. Diese Hierarchieebenen und deren Definition werden in dieser Arbeit ebenso verwendet.

¹²¹ S. Fußnote 120.

tige Planungen einfließen können und auch allen rechtlichen und externen Verpflichtungen genügen. Die oberste Leitung delegiert entsprechende Aufgaben an untergeordnete Gruppen.

- Ab einer gewissen vorliegenden Unternehmensstruktur eignet sich, der obersten Leitung untergeordnet, die Einsetzung eines *Beauftragten für Energiemanagement*. Dieser stellt die Erhebung und Übermittlung aller energiebezogenen Ergebnisse an die oberste Leitung sicher. Der Beauftragte muss alle in der Organisation verwendeten Energiekennzahlen nutzen dürfen und gibt vor, wie vergleichbare Energieeffizienzaussagen von unterschiedlichen Anlagen und Prozessen gewonnen werden können. Sind keine Kapazitäten für die Schaffung eines Beauftragten verfügbar, müssen die oberste Leitung und Anlagenleitung entsprechende Aufgaben übernehmen.
- Die *Anlagenleitung* ist für vereinbarte Ergebnisse verantwortlich und steuert üblicherweise die Ressourcen der Reinigungsanlage. Der Anlagenverantwortliche muss die Erhebung deskriptiver und normativer Effizienzbewertungen verstehen und auf Abweichungen von Vorgaben reagieren können. Neben dem energetischen Verständnis sollte die finanzielle Dimension von Abweichungen verstanden sein.
- Das *Betriebs- und Instandhaltungspersonal* ist verantwortlich für die Verwendung von Energiekennzahlen bei der Steuerung und Sicherstellung des Betriebs. Ebenso ist es für die direkte Ausübung von Korrekturmaßnahmen verantwortlich. Es sind Kennzahlen zu verwenden, die dem Kenntnisstand des Personals entsprechen bzw. durch Schulungen zu vermitteln sind.
- Der *Prozessingenieur* plant, führt aus und bewertet Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der Reinigungsanlage. Auswahl und Nachweis dafür geeigneter Kennzahlen obliegt seiner Verantwortung. Die Komplexität der verwendeten Effizienzbewertungen ist beim Prozessingenieur am größten.
- Neben den technischen Nutzergruppen trägt die Leitung der Organisation dafür Sorge, dass auch ökonomische Gruppen, wie der *Einkauf*, entsprechende Energieeffizienzbewertungen der Reinigungsanlagen verwenden. Damit können zukünftige Planungen erleichtert und Abweichungen von Zielvereinbarungen verringert werden.
- Die oberste Leitung trägt die Verantwortung, dass *externe Benutzer* – Aufsichtsbehörden, Auditoren von EnMS, Kunden oder andere Organisationen – die für sie relevanten Kennzahlen erhalten.

3.4.2 Hersteller der Reinigungsanlagen

Auch auf den Hersteller einer Reinigungsanlage kommen verschiedene Anforderungen für eine energetische Bewertung des Betriebsverhaltens zu. Die Lastenhefte¹²² des Maschinennutzers ergeben sich als Basis des zu beschaffenden Ist-Stands. Müssen die energetischen Effizienzkennzahlen verbessert werden, ergeben sich dadurch direkte Anforderungen an die Maschinenentwicklung für den Hersteller. In Abb. 3-5 sind drei Ebenen mit direkten Schnittstellen für die Kommunikation energiebezogener Kennzahlen durch Strichpunktlinien markiert.

¹²² S. DIN 69901-5.

- Das *Prozessengineering* ist im besonderen Maße für eine energieeffiziente Arbeitsweise der zu entwickelnden Maschine verantwortlich. Nach der Festlegung auf bestimmte zu reinigende Bauteile bestimmen sie durch die Technologiewahl und Prozessspezifikationen das ETM und EEV_T , s. Abschnitt 3.3.2. Als Benchmarkwerte sollten sowohl deskriptive als auch normative Energieeffizienzbewertungen in eigenen Messungen ermittelt und bei den anderen Gruppen der Organisation als Zielkriterium festgelegt und entwickelt werden.
- Die *konstruktive Gruppe* des Herstellers ist vor allem für die Berücksichtigung und den Einbau energieeffizienter Maschinenkomponenten verantwortlich. Wird hierbei nicht die energetische Effizienz des Aufbaus und der Komponenten berücksichtigt, ergeben sich beim Nutzer im Falle hoher Auslastungsraten geringe Energieeffizienzkennzahlen. Dies ist vor allem für den Hersteller mit einer schlechten Reputation verbunden, da die konstruktive Verantwortung zumeist bei ihm liegt¹²³.
- Der *Vertrieb* sollte auf verschiedenen Dimensionen das energetische Verhalten durch Energieeffizienzbewertungen darstellen können. Die Dimensionen umfassen rechtliche Vorgaben, Nachhaltigkeitsaspekte, Energie- und Ressourcenkosten und ebenso die glaubhafte Darstellung der qualitativen und quantitativen Benchmarks bei gleichzeitiger Kostenminimierung. Die direkte Verbindung von Vertrieb auf Herstellerseite und Einkauf auf Nutzerseite sollen andere Verknüpfungen zwischen verschiedenen Gruppen nicht ausschließen. Es ist sogar davon auszugehen, dass der Vertrieb von Produktionsanlagen mit technischem Fachpersonal die Spezifikationen für den Einkauf vereinbart.

3.4.3 Anwendungen für Energieeffizienzbewertungen

Die Differenzierung nach unterschiedlichen Anwendergruppen sowohl auf Seiten der Hersteller von Reinigungsanlagen als auch auf der der Nutzer führt über deren Verantwortungsbereich und Funktion in der Organisation zu der Frage, wofür die Informationen über die ermittelten Energieeffizienzen genutzt werden sollen. Die oberste Leitung bzw. der beauftragte Energiemanager hat die Aufgabe, über Optimierungen die Energiekosten zu minimieren. Die übergeordnete Struktur einer rationellen Energiebereitstellung und -nutzung ist dabei ein strategisches Ziel¹²⁴. Zukünftige Planungen für Systemoptimierungen setzen dabei immer auf eine Analyse des Ist-Stands, um über die Sollgrößen entscheiden zu können. Die Ist-Analyse über entsprechende Kennzahlen (EEV_R in Gleichung (3-7)) und die Relationen des wechselseitigen Verhaltens des EPM und EMM sowie der Sensitivität auf bestimmte Einflussfaktoren können entscheidende Informationen über geeignete Maßnahmen zur Energiekostenreduzierung liefern.

Die Aufgabenstellung der Prozessingenieure ist damit verbunden, dass die Fertigungsverfahren qualitativ, preislich und zeitlich kontinuierlich verbessert werden sollten. Dabei kommt den eingesetzten Ressourcen und deren Nutzung bei der Produktion eine große Bedeutung

¹²³ Im Gegensatz zu niedrigen Energieeffizienzen durch Applikationsfehler.

¹²⁴ S. DIN ISO 50006.

zu. Bei der Prozessauswahl und/oder deren –optimierung können gerade die schrittweise Ermittlung von Energieeffizienzen und eine energetische Analyse beginnend beim physikalischen Grundsystem (3-2) und der energetischen Bewertung der Technologie (3-4) wichtige Ansätze liefern, wie ein Produktionssystem optimiert werden kann.

Die Forderung nach minimierten Energiekosten, ressourcenschonende Auswahl und Auslegung der Produktionsverfahren liefern wichtige Implikationen für die Erstellung von Lastenheften bei der Beschaffung und Optimierung der genutzten Produktionsanlagen. Um fundierte und verständliche Angaben über das energetisch-geforderte Verhalten der Reinigungsanlagen in einer zukünftigen Produktion machen zu können, sind Kennzahlen über deren Energieeffizienz ein wichtiges Instrument. Dadurch können alle beteiligten Akteure – Einkauf, Anlagenleitung, Prozessingenieure – eine fachliche und sachliche Grundlage bilden, um alle gewünschten Eigenschaften vom Hersteller einzufordern.

Dies macht deutlich, dass die Hersteller der Maschinen an einer einheitlichen und klaren Energieeffizienzbewertung interessiert sind, um die Vorzüge ihrer Produkte gegenüber Konkurrenten hervorheben zu können. Dies kann nur gelingen, wenn durch Transparenz nachvollziehbare und reproduzierbare Angaben über das energetische Verhalten vorliegen und vermittelt werden. Diese drei in diesem Abschnitt genannten Anwendungen von Energieeffizienzbewertungen – Energiekostenreduzierung, Prozessoptimierung, Anlagenoptimierung – werden nochmals anschaulich an einem Beispiel in Kapitel 7 aufgezeigt.

3.5 Teilzusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurde eine Systematik für die Energieeffizienzbewertung von Reinigungsanlagen entwickelt. Der Ablauf, wie die Systematik in dieser Arbeit genutzt wird ist in Abb. 3-6 dargestellt. Zunächst sind die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale von Effizienzbetrachtungen im energiewirtschaftlichen Kontext aufgezeigt worden. Wichtige Kriterien bei der Erarbeitung sind die geeignete Definition von Bilanzgrenzen, s. 3.2.3, und das Wissen um die Festlegung der Aussageart, s. 3.2.2. Diese Kriterien bilden zusammen die Formalisierung, die für die weitere Berechnungsmethode unablässig ist, um korrekte, transparente und übertragbare Ergebnisse zu gewinnen.

Der Ansatz, der zur Berechnung der Energieeffizienz einer Bauteilreinigungsanlage herangezogen wird, ist die MVC-Methode, s. Unterkapitel 3.3. Für jeden definierten Bewertungsraum werden entsprechende minimale Energiebedarfe ermittelt, die für die dabei zu erzielenden Transformationen benötigt werden. Die Bewertungsräume sind so gewählt, dass das zuvor ermittelte Minimum die Basis für den neuen Energiebedarf darstellt. Der minimal mögliche Energiebedarf zur Transformation einer verunreinigten Bauteiloberfläche in eine technische saubere entspricht der Energie aus den physikalischen Verbindungen. Werden zu dieser Energie, die Beträge addiert, die zur Umwandlung der Energie bei einer bestimmten Technologie und Energiedissipation durch Prozessspezifikationen benötigt werden, addiert, ergibt sich das energetisch-technologische Minimum. Diese schrittweise Berechnung setzt sich fort, bis zum gemessenen Energiewert einer Reinigungsmaschine in der laufenden Produktion. Eine wichtige Informationen über die Energieeffizienz von Reinigungsanlagen und der dort stattfindenden Verfahren liefert die Bildung von Relationen zwischen diesen Einzelminima.

Die Relation wird immer in Bezug zum gemessenen Energiebedarf vorgenommen. Die so gewonnenen Energieeffizienzen sind der EEV_P des physikalischen Minimums (3-3), der EEV_T des technologischen Minimums (3-5) und der EEV_R des realen Minimums (3-7). Die reine Ermittlung und Berechnung der EEV_i hat nur eine begrenzte Aussagekraft. Zusätzlich müssen aus den deskriptiven Bewertungen normative Bezüge hergestellt werden. In dieser Arbeit werden aus diesem Grund Benchmark-Berechnungen durchgeführt. Diese Berechnungen sollen eine Vergleichsmöglichkeit liefern, um den Energieaufwand für vorgegebene Verunreinigungen und zu erreichende Sauberheitsklassen abzuschätzen, die Energieeffizienz des Spritzreinigungsverfahrens zu bewerten und den Einfluss der Energiedissipation beim Betrieb einer Reinigungsmaschine in einer realen Produktionsumgebung zu bestimmen.

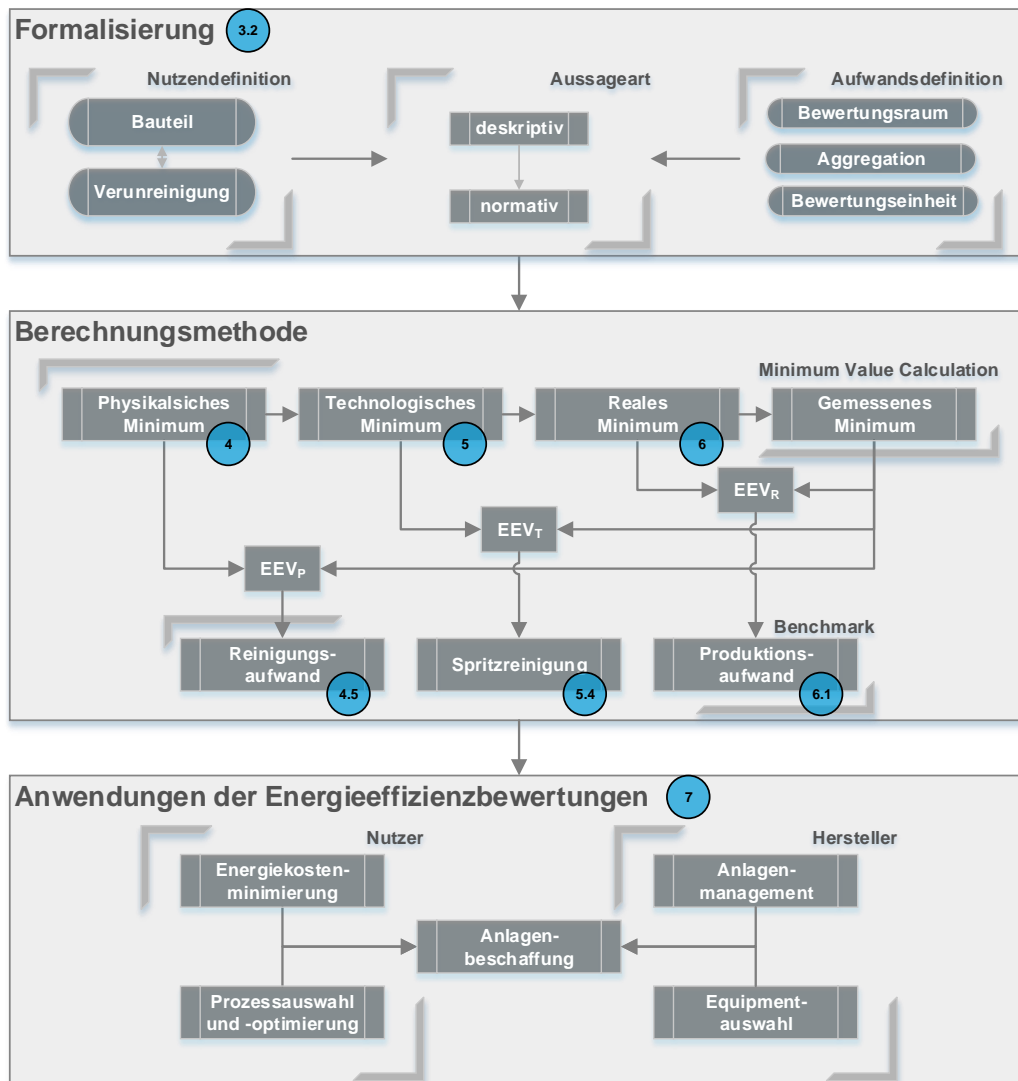


Abb. 3-6: Bewertungssystematik und deren Anwendung für Nutzer und Hersteller von Reinigungsanlagen (in blaufärbten Kreisen sind die Kapitel- und Unterkapitelnummern dieser Arbeit angegeben)

Auf dieser Basis lassen sich die Energiekosten und deren Aufteilung für ein Reinigungsverfahren bewerten und durch erläuterte Maßnahmen optimieren. Durch die Nutzung von

Benchmarks kann die Prozessauswahl und –optimierung erleichtert werden. Zusammengeführt werden die Anwendergruppen einer Reinigungsmaschine durch eine validierte Angabe für die Energieeffizienzbewertung einer wässrigen Einkammerspritzreinigungsanlage.

4 Ermittlung der Bindungsenergien von Verunreinigungen

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, muss eine Energieeffizienzanalyse nach der MVC-Methode mit der Ermittlung und Berechnung des energetisch-physikalischen Minimums beginnen. Im Falle der Bauteilreinigung handelt es sich dabei um die Bindungsenergien zwischen den Verunreinigungen und dem Bauteil. Damit wird der Nutzen für die Energieeffizienzbewertung als physikalisches Minimum zum Entfernen der Verunreinigungen definiert. Das Vorgehen zur Ermittlung des EPM ist in Abb. 4-1 dargestellt.

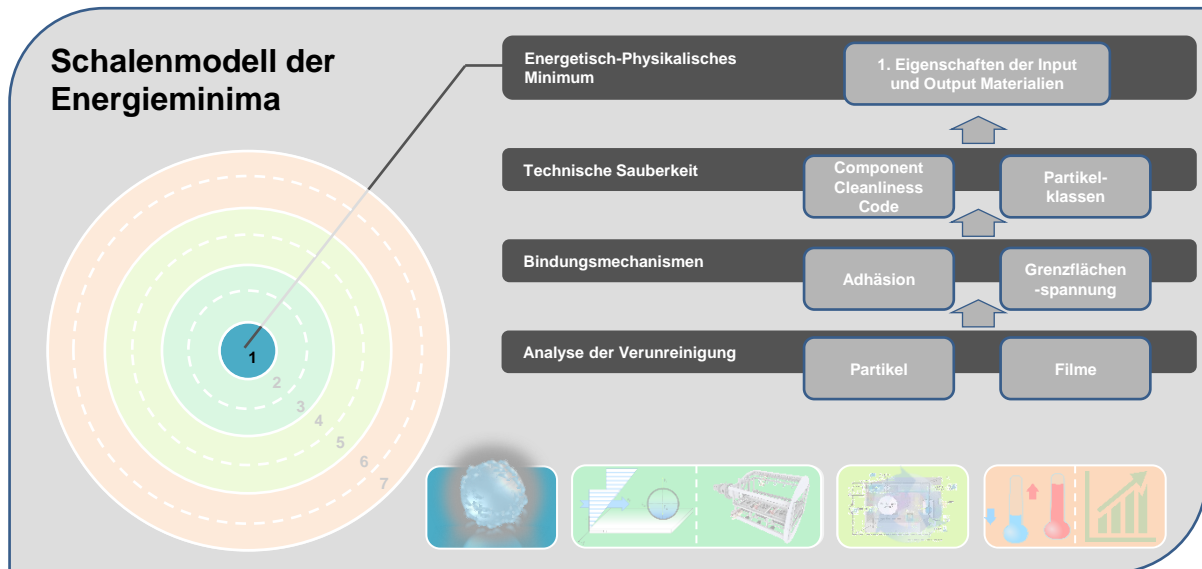


Abb. 4-1: Vorgehen zur Berechnung des Energetisch-Physikalischen Minimums für die Bauteilreinigung¹²⁵

Zu Beginn werden die Arten von Verunreinigungen untersucht und systematisiert. Die verschiedenen Verschmutzungsarten unterliegen eigenen phänomenologischen Besonderheiten in ihrer physikalischen und chemischen Struktur, die zu charakteristischen Bindungsmechanismen führen und anhand eines geeigneten Modells berechenbar sind. Da es eine absolute Sauberkeit nur in theoretischen Überlegungen geben kann, hat sich in der praktisch orientierten Fertigung der Begriff der technischen Sauberkeit entwickelt. Die dadurch getroffenen Vereinfachungen werden herangezogen, um das EPM eines Beispielbauteils aus der zerspanenden Fertigung zu berechnen.

4.1 Arten der Verunreinigungen

Im Kapitel über die Verfahrensauswahl von Reinigungsprozessen wurden bereits die fertigungstechnischen Hintergründe zur Behandlung von Bauteiloberflächen erläutert, s. 2.1.1. Da die Verfahrensauswahl immer mit der Untersuchung von kausalen Abhängigkeiten einhergeht, ist dies auch für die Untersuchung und Analyse der Bindungsenergien zwischen Ver-

¹²⁵ Eigene Darstellung.

unreinigungen und Bauteiloberfläche zielführend. Werden die verschiedenen Verunreinigungsarten untersucht, s. Abb. 4-2, fallen zwei Gruppen auf, die am häufigsten die Oberflächeneigenschaften störend beeinflussen: die partikulären und filmischen Verunreinigungen.

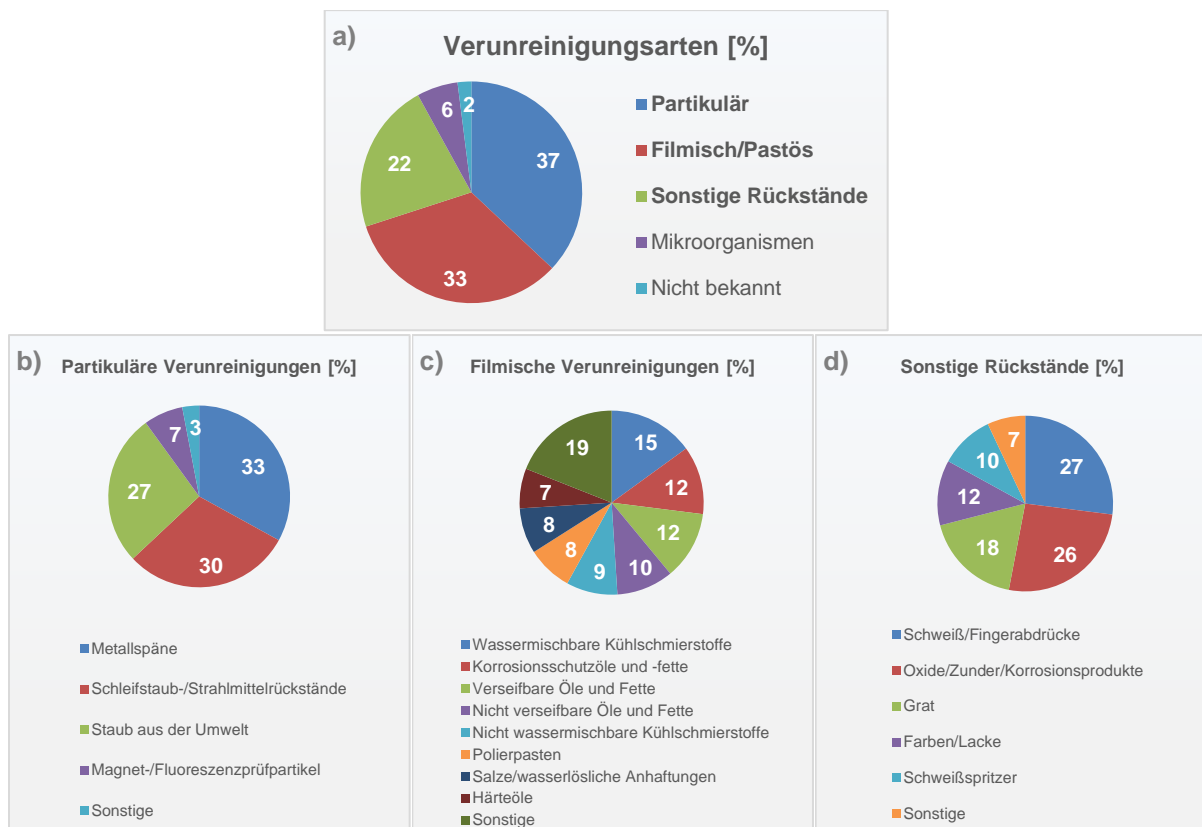


Abb. 4-2: Übersicht der unterschiedlichen Verunreinigungsarten und ihrer relativen Häufigkeit unter befragten Anwendern von industrieller Reinigung¹²⁶

Neben diesen fallen Verunreinigungsarten auf, die eine geringe relative Häufigkeit unter Anwendern aufweisen, wie eine Studie durch Befragung von Vertretern der Branche zeigte¹²⁷. Diese sind zusammenfassend unter sonstige Verunreinigungsarten in Abb. 4-2 dargestellt. Die partikulären und filmischen sind mit ca. 70 % die am häufigsten auftretenden Verunreinigungsarten. Aus diesem Grund soll in dieser Arbeit der Fokus auf diese Verunreinigungsarten und ihre energetischen Wirkmechanismen gelegt werden. Die grundlegenden energetischen Zusammenhänge von Verunreinigungseigenschaften und Bauteil können auch auf die sonstigen Rückstände übertragen werden. Die jeweiligen Besonderheiten, die auch auf die Bindungsenergien großen Einfluss haben können, sollen hier nicht weiter untersucht werden. In der Literatur können hierzu vielfältige Analysen studiert werden¹²⁸.

Unter den partikulären Verunreinigungen bilden die Metallspäne und Schleifmittelrückstände die größten Gruppen, s. Abb. 4-2 b), mit 33 % respektive 30 % Anteil bei den Anwendern einer Bauteilreinigung. Auch Staub aus der Umwelt stellt für insgesamt 27 % der Befragten eine zu entfernende Partikelverschmutzung dar. Bei den filmischen Verunreinigungen

¹²⁶ Vgl. Bilz et al. 2013.

¹²⁷ S. Bilz et al. 2013, S. 35.

¹²⁸ S. Urbakh et al. 2004; Donlan 2002 für weitergehende Studien zum adhäsiven Verhalten von Mikroorganismen und Cornell und Schwertmann 2003 für tiefergehende Betrachtung zum Wesen von Eisenoxiden.

wird die Unterteilung nach ihrem Einsatzzweck und den chemischen Eigenschaften getroffen. Diese Gruppen sind näherungsweise gleich verteilt. In 24 % der Fälle treten Kühlschmierstoffe (wasserlöslich und –unlöslich) auf, 34 % zählen zu den Ölen und Fetten (Korrosionsschutz, verseifbar und nicht verseifbar) und sonstige filmische Verunreinigungen mit einem jeweiligen Anteil < 9 %. In den nächsten beiden Abschnitten werden nun die mit ihrem Anteil an der Bauteilreinigung angegebenen Verunreinigungsarten, s. Abb. 4-2 b) und c), näher beschrieben.

4.1.1 Partikuläre Verunreinigungen

Partikel auf einer Bauteiloberfläche zählen als Kontamination, sobald sie eine potenzielle negative Wirkung auf die Funktionsfähigkeit ausüben¹²⁹. Als Partikel gelten feste Körper unterschiedlicher Materialien mit der Einteilung in metallisch und nicht metallisch¹³⁰. Metallische Partikel lassen sich von nicht metallischen durch ihre glänzende Oberfläche unterscheiden. Je nach Material, Ursprung und negativer Wirkung besitzen Partikel unterschiedliche Schädigungspotenziale. Je nach Bauteilfunktion können Partikel¹³¹

- ein Verstopfen von Ventilen und Düsen,
- ein Verklemmen von bewegten Komponenten,
- eine Beschädigung von Lagerlaufflächen,
- Leckagen in Fluid führenden Dichtungssystemen oder
- Kurzschlüsse in elektronischen Schaltungen

bewirken. Ob ein Partikel zu einem Schädigungsmechanismus führt, hängt von dessen Gestalt (Form und Größe), Anzahl und Materialeigenschaften ab. In der metallverarbeitenden Industrie gehören Partikel zumeist der Klasse von Metallspänen oder Schleifmittelrückständen, s. Abb. 4-2, an. Bei der spanenden Bearbeitung wird durch den Werkzeugeingriff die werkstoffabhängige maximale Schubspannung überschritten, sodass in Abhängigkeit der Schnittparameter (Schnittwinkel, Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und Schnitttiefe) der Werkstoff zu fließen beginnt¹³². Bei optimaler Konfiguration der Parameter und idealen Ausgangsmaterialien kommt es bei der Bearbeitung zu einer regelmäßigen Spanbildung¹³³. Der Eingriff des Werkzeugs in das Werkstück mit der dabei auftretenden Gefügeveränderung und Spanbildung ist in Abb. 4-3 (li.) dargestellt.

¹²⁹ Vgl. Schmauz 2010, S. 20.

¹³⁰ Vgl. Trunz 2013, S. 11.

¹³¹ S. Schmauz 2010, S. 21.

¹³² S. Klocke 2018, 56f.

¹³³ Es werden hier vier verschiedene Spanarten unterschieden: Fließspan, Lamellenspan, Scherspan, Reißspan. Denkena und Tönshoff 2011, S. 21.

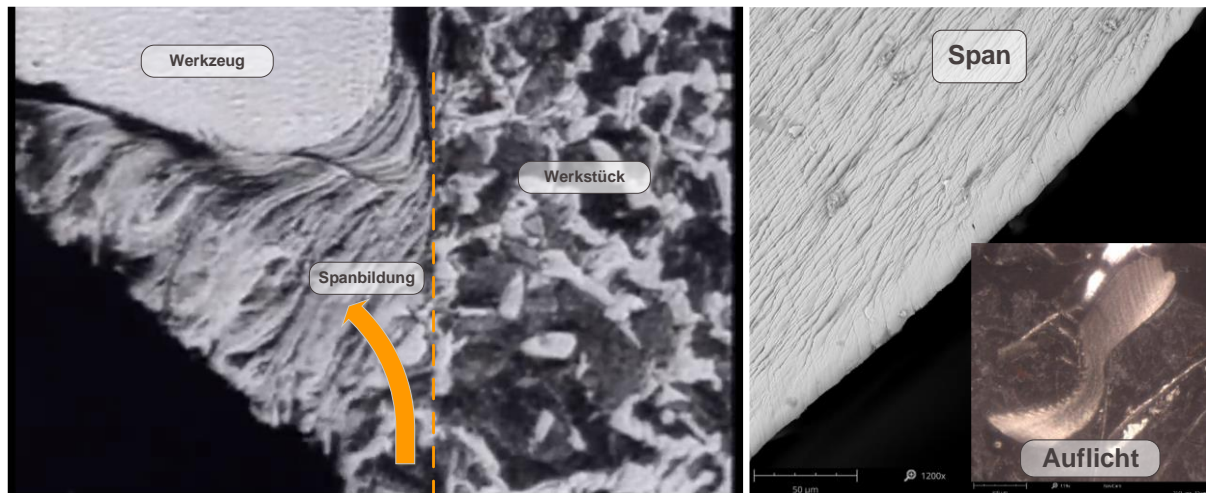


Abb. 4-3: Aufnahme des Werkstückeingriffs in die Werkstückoberfläche und Umformung des Gefüges in einen Span¹³⁴ (li.); Auflicht- und Elektronenmikroskopieaufnahme eines Lamellenspans¹³⁵ (re.)

Durch die auftretenden großen Belastungen des Werkzeugs kommt es zu Verschleißerscheinungen, die zu einem kontinuierlichen Materialabtrag an diesem führen¹³⁶. Durch Materialfehler beim Werkstoff und Werkstück und dem Verschleiß treten abweichend von der idealen Spanbildung Ausbrüche und Materialverformungen auf, die verschieden geformte Partikel hervorrufen. Diese Spanbrüche und die Werkstückspäne bilden zusammen die metallischen partikulären Verunreinigungen bei zerspanender Bauteilfertigung, s. Abb. 4-3 (re.).

4.1.2 Filmische Verunreinigungen

Filmische Verunreinigungen entstehen als Rückstände von Hilfs- oder Betriebsstoffen, die bei der Fertigung eingesetzt werden. Es handelt sich um fluide Phasen, die sich aus unterschiedlichen Stoffen zusammensetzen können. Darunter fallen alle Stoffmischungen, die fließen können (Emulsionen, Suspension, Dispersion). Wie in Abb. 4-2 angegeben, werden die filmischen Verunreinigungen nach ihrer Herkunft und chemischen Eigenschaften klassifiziert:¹³⁷

- Wassermischbare Kühlschmierstoffe
- Korrosionsschutzöle und -fette
- Verseifbare Öle und Fette
- Nicht verseifbare Öle und Fette
- Nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe
- Sonstige organische und anorganische Stoffe und Stoffmischungen

¹³⁴ S. Warnecke und Hummel 1977 Einzelbild <https://doi.org/10.3203/IWF/C-1247eng#t=01:42,06:55>.

¹³⁵ Eigene Aufnahme.

¹³⁶ Die Hauptmechanismen des Verschleiß sind Adhäsion, Abrasion, tribochemische Reaktionen und Oberflächenzerüttung, s. Klocke 2018, S. 84.

¹³⁷ S. Wullstein 2004, 6ff.

Die negative Wirkung von filmische Verunreinigungen liegt in der Veränderung der Oberflächeneigenschaften der Werkstoffmaterialien. Zur Herstellung eines Bauteils in der metallverarbeitenden Industrie sind verschiedene Zerspanoperationen notwendig, um die gewünschte Geometrie und Oberflächeneigenschaften zu erzeugen. Durch die heutige geforderte Leistungsfähigkeit der angewendeten Verfahren müssen dabei genutzte Kühlschmierstoffe (KSS) auf ebenso spezialisiertem Leistungsniveau operieren. Die Eigenschaften sind dabei häufig genau auf die Bearbeitung und die Randbedingungen angepasst. Eine Beispielfertigungskette mit integrierten Reinigungsstufen ist in Abb. 4-4 dargestellt.

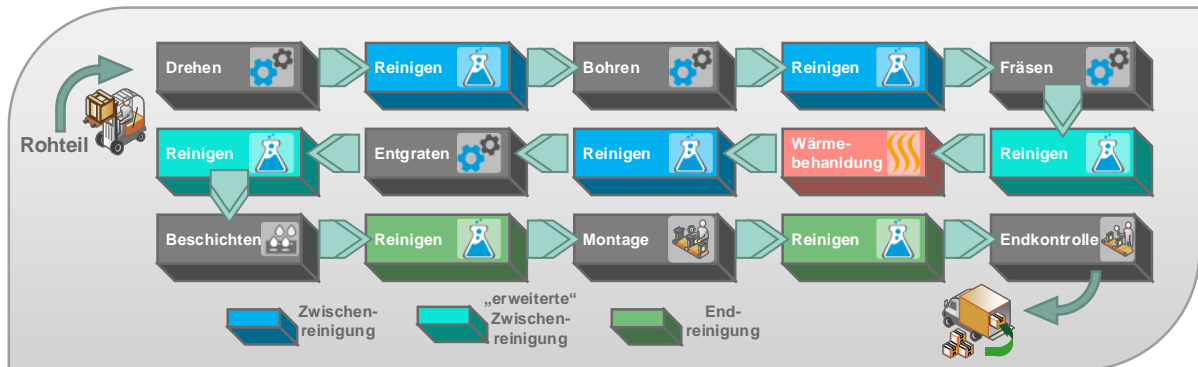


Abb. 4-4: Beispielfertigungskette mit Zerspanoperationen und Reinigungsstufen zur Entfernung der Verunreinigungen¹³⁸

Die schädigende Wirkung der filmischen Verunreinigung liegt zumeist in der Beeinflussung nachfolgender Fertigungsschritte. Nach der spanenden Bearbeitung erfolgt in der Regel eine Zwischenreinigung, um eine Beeinflussung der eingesetzten Hilfsstoffe zu vermeiden.

Die Kühlschmierstoffe sind eingeteilt in wassermischbar und nicht wassermischbar¹³⁹. Wassermischbare KSS werden unterschieden in emulgierbar und wasserlöslich. Die hohen Wasseranteile von bis zu 99 % erzielen sehr gute Kühlungseigenschaften. Den Rest bilden Esteröle oder Mineralöle und die für die Öl-Wasser-Mischung benötigten Emulgatoren, wie Alkaliseifen von Fettsäuren oder Naphtensäuren¹⁴⁰. Nichtwassermischbare KSS sind zumeist reine Mineralöle oder synthetische Öle. Diese Öle werden zu den nicht verseifbaren Ölen und Fetten gezählt, da ihnen die für die Hydrolyse benötigte Estergruppe fehlt. Verseifbare Öle, Fette und Wachse umfassen somit alle Esteröle¹⁴¹.

Bei der Zerspanung und wechselnden Operationen können Rückstände die Wirkungen der eingesetzten KSS massiv beeinflussen und verändern. Dadurch können Schmierwirkung und Kühlung nicht mehr in dem geforderten Maße erfolgen. Werden die Werkstücke oberflächenbehandelt, muss sichergestellt werden, dass die Werkstückoberfläche frei von Filmen ist. Thermochemische Wärmebehandlungen sind ein Beispiel, bei dem Rückstände von KSS die Ausbildung der Stickstoffdiffusionsschicht verhindern und somit die eingestellten Werkstoffeigenschaften nicht erreicht werden können.¹⁴²

¹³⁸ Eigene Darstellung. Vgl. Schulze 2017.

¹³⁹ DIN 51385:2013 – 12

¹⁴⁰ Vgl. Klocke 2018, S. 255.

¹⁴¹ Latscha et al. 2016, S. 457.

¹⁴² Vgl. Blum et al. 2015.

Eine weitere schädigende Wirkung besitzen Filme bei Fügeverfahren und den dortigen Funktionsflächen. Kleben, Schweißen und Löten setzen in sehr engen Grenzen definierte Oberflächen voraus, damit diese Verbindungen über die geforderten Spannungszustände verfügen¹⁴³.

Die Endreinigung ist in vielen Fertigungen obligatorisch, da die Montage über weitaus strengere Sauberkeitsanforderungen verfügt und das Produkt zum Versand an den Kunden vorbereitet wird.

4.2 Modell des Bindungsmechanismus von Verunreinigungen

Um das physikalische Minimum des Energieaufwands bei der Bauteilreinigung zu bestimmen, ist es notwendig, die Verunreinigungen und deren Lage auf den Bauteilen zu untersuchen. Die Verunreinigungen gehen mit der Bauteiloberfläche chemische oder physikalische Verbindungen ein. Diese müssen durch Einsatz von Energie aufgelöst werden. Um zu beschreiben, wieviel Energie minimal benötigt wird, müssen somit diese Bindungsenergien bestimmt werden. Dazu ist es zunächst erforderlich, Verunreinigung zu klassifizieren und getrennt zu analysieren, da die Bindungsmechanismen deutliche Unterschiede aufweisen und dadurch auch unterschiedliche Ansätze zum Lösen dieser Verbindungen energetisch sinnvoll sind.

4.2.1 Oberflächenwechselwirkungen

Bindungsmechanismen fassen alle physikalischen und chemischen Vorgänge begrifflich zusammen, die beim Kontakt von unterschiedlichen Phasen zu betrachten sind.¹⁴⁴ Die Mannigfaltigkeit der Bereiche in der Fertigungstechnologie¹⁴⁵, die sich mit Bindungsmechanismen auseinandersetzt, zeigt auch schon deren Komplexität und Diversität. Wird sich den Mechanismen und ihrer technologischen Anwendungen genähert, müssen die phänomenologischen Prinzipien auf drei Größenskalen untersucht und ihre jeweiligen Wirkprinzipien verstanden werden.¹⁴⁶ Diese Skalen sind in Abb. 4-5 schematisch dargestellt.

¹⁴³ Vgl. Habenicht 2009, S. 544.

¹⁴⁴ Vgl. Popov 2015, S. 2.

¹⁴⁵ Hierzu zählen Beschichtungsvorgänge (unterschieden in Aggregatzustände, wie Lackieren od. Emaillieren, Galvanisieren od. Verzinken u.v.a., Pulverbeschichten od. Auftragsschweißen; s. DIN 8580) Kleben, Reinigung

¹⁴⁶ S. Tomas 2007, S. 1997.

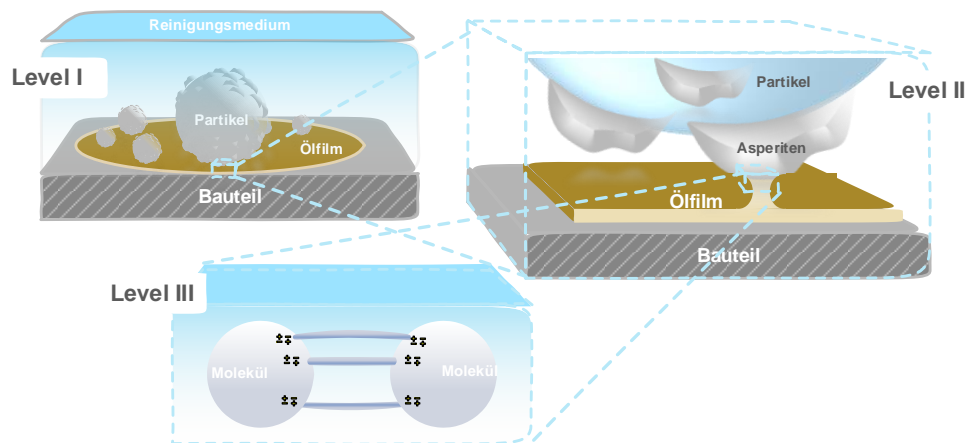


Abb. 4-5: Kontinuumsmechanik, Mikromechanik, Molekulardynamik im Falle einer wässrigen Reinigung¹⁴⁷

Die oberste Skala (Level I) beschäftigt sich mit der Physik der Kontinuumsmechanik für die Impulsübertragung und Entwicklung des chemischen Potenzials des Reinigungsmediums auf die partikulären und filmischen Verunreinigungen. Auf der Ebene der zweiten Skala (Level II) müssen die Wechselwirkungen zwischen festen und flüssigen Phasen und die mikromechanischen Kontakte zwischen Partikel und Bauteiloberfläche untersucht werden. Diese Wechselwirkungen und Phänomene beruhen letztlich auf den physikalischen und chemischen Interaktionen auf molekularer bzw. atomarer Ebene (Level III). Die Bindungsmechanismen in den Skalen von Level II und III werden als Adhäsion bezeichnet und in Abschnitt 4.2.2 ausführlich behandelt.

Die Bindungen beruhen auf atomaren und molekularen Wechselwirkungen. Werden zwei Teilchen betrachtet, können die in Abb. 4-6. dargestellten Effekte beschrieben werden.



Abb. 4-6: Bindungseffekte¹⁴⁸

Unterschieden werden die Effekte und die daraus resultierenden Kräfte in zwei Gruppen: Bindungen, verursacht durch Kräfte und Kraftfelder bei direktem Kontakt, und Materialbrückenbindungen. Die direkten Kontaktkräfte unterteilen sich in Van-der-Waals-Kräfte, elektrostatische Kräfte, magnetische Kräfte und direkte Materialspannungen durch Verhakungen der

¹⁴⁷ Eigene Darstellung. Vgl. Tomas 2007.

¹⁴⁸ S. Tomas 2007, S. 1999.

Oberflächen. Elektrostatische Kräfte müssen berücksichtigt werden, wenn es sich bei den Bindungspaarungen um zwei verschiedene Stoffe bzw. Materialien handelt oder elektrische Felder innerhalb der Bilanzgrenze wirken. Dabei treten durch die unterschiedlichen atomaren Elektronegativitäten Ladungsverteilungen auf, die in einer Kraftwirkung¹⁴⁹ F_{el} resultieren. Formal für zwei Punktladungen ausgedrückt, können die Kräfte über Gleichung (4-1) berechnet werden.

$$F_{el}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (4-1)$$

mit

ϵ : dielektrische Konstante des jeweiligen umgebenden Mediums

ϵ_0 : Dielektrizitätskonstante des Vakuums

q_i : Elektrische Ladungen 1 und 2

r : Abstand zwischen den Punktladungen

Elektrostatische Kräfte umfassen die maßgeblichen Wirkungen zur Beschreibung der Bindungsmechanismen von Festkörpern¹⁵⁰. Daraus ableiten lassen sich auch die Bindungen zwischen verschiedenen Körpern untereinander. Magnetische Kräfte treten bei bewegten elektrischen Ladungen oder in Folge von ferromagnetischen Materialeigenschaften auf. Da diese Eigenschaften gezielt erzeugt oder verhindert werden können, sollen sie in dieser Arbeit nicht weiter besprochen werden, da sie im Falle der Bauteilreinigung nur eine untergeordnete Rolle spielen¹⁵¹, s. Abb. 4-2.

Van-der-Waals-Kräfte¹⁵² beschreiben die gegenseitige Wechselwirkung von zwei molekularen Dipolen. Ein Molekül wird als Dipol bezeichnet, wenn sich die elektronische Ladung in einem Molekül permanent an den Enden konzentriert und es somit polarisiert ist¹⁵³. Je nach Ursprung ihrer Polarisierung treten drei verschiedene Kraftwirkungen auf.

Die *Keesom¹⁵⁴-Kraft* beschreibt die Wechselwirkung von zwei permanenten Dipol-Paaren. Sie zeigt sich als Repulsion oder Attraktion von gleich oder gegensätzlich polarisierten Molekülen. Des Weiteren besitzt sie die Fähigkeit für eine regelmäßige Orientierung von gleichen Molekülen zu sorgen.

Auch wenn ein polarisiertes Molekül auf ein unpolarisiertes trifft, resultiert daraus eine Wechselwirkung. Dies geschieht über den Induktionsmechanismus eines elektrischen Feldes durch das wirkende Dipolmoment. Dadurch wird ein induzierter Dipol beim eigentlich unpolaren Molekül erzeugt. Diese Wechselwirkung und Kraft wird nach seinem Entdecker¹⁵⁵ *Debye-Kraft* genannt.

¹⁴⁹ Diese Kraft wird nach seinem Entdecker dem französischen Physiker *Charles Augustin de Coulomb* (1736-1806) *Coulomb-Kraft* genannt.

¹⁵⁰ S. Hering et al. 2016, S. 703.

¹⁵¹ Für Berechnungen und weiter gehende Informationen an dieser Stelle auf Sekundärliteratur verwiesen: Hering et al. 2016, 237ff; Maxwell 1865.

¹⁵² Johannes Diderik van der Waals (1837-1923) war ein niederländischer Physiker und fand im Rahmen seiner Dissertation grundlegende Zusammenhänge zwischen Gas- und Flüssigphase und die dabei nach ihm benannte Kraft.

¹⁵³ S. Dutschk 2000, S. 29.

¹⁵⁴ Willem Hendrik Keesom (1876-1956) war ein niederländischer Physiker, der die mathematische Theorie hinter der Wechselwirkung verfasste.

¹⁵⁵ Peter Debye (1884-1966) war ein niederländischer Physiker und Chemiker.

Aber auch Molekülsysteme mit symmetrischer Ladungsverteilung weisen Wechselwirkungen miteinander auf. Durch Fluktuationen¹⁵⁶ kommt es zu Verschiebungen der Ladungsträger eines Moleküls und dadurch zum Aufbau eines Dipolmoments und elektrischen Feldes. Dieser selbstinduzierte Dipol erzeugt bei benachbarten Molekülen eine induzierte Polarisation. Diese resultierende Wechselwirkung wird auch Dispersionskraft oder *London-Kraft*¹⁵⁷ genannt.

Die Van-der-Waals-Kräfte sind der Ausdruck für eine elektrostatische Kraft zwischen Atomen und Molekülen ohne den Austausch von Elektronen¹⁵⁸. Die drei Anteile der Van-der-Waals-Kräfte wirken unterschiedlich stark, wobei die London-Kräfte deutlich überwiegen. Die formale Beschreibung der Kräfte lässt sich am einfachsten über eine Beziehung des elektrischen Feldes der unterschiedlichen Dipolmomente herstellen. Dies mündet in Gleichung (4-2) als Ausdruck der Wechselwirkungsenergie zwischen induzierten Dipolen U .

$$U = -\mu_{ind}E = -\alpha E^2 \quad (4-2)$$

mit

μ_{ind} : Induziertes Dipolmoment

E : Äußeres elektrisches Feld

α : Polarisierbarkeit

Alle Kräfte, die eine Proportionalität zu

$$U(r) \propto -\frac{C}{r^6} \quad (4-3)$$

mit

C : Konstante

zeigen, werden den Van-der-Waals-Kräften zugeordnet¹⁵⁹. Es ist leicht verständlich, dass die attraktiven Kräfte der polarisierten Moleküle und Teilchen eine Begrenzung eines minimalen Abstands zueinander verfügen. Der atomar gleiche Aufbau von Atomkern und -hülle, der darin enthaltenen Elementarteilchen und seine physikalischen Zusammenhänge verhindern, dass Masse ohne Volumen nicht vorhanden sein kann. Die zunehmende Abstoßung der Teilchen, bei sich verkleinerndem Abstand zwischen ihnen, ergibt sich durch ihre quantenmechanische Betrachtung der Pauli¹⁶⁰-Repulsion¹⁶¹. Werden die repulsiven und attraktiven Kräfte zwischen Teilchen zusammengefügt, so ergibt sich in Abhängigkeit vom Teilchenabstand ein

¹⁵⁶ Spontane Abweichungen vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand. Diese Abweichungen haben einen quantenchemischen Hintergrund und können in entsprechender Sekundärliteratur, z. Bsp. Sauer 1989, genauer nachvollzogen werden.

¹⁵⁷ Benannt nach dem deutsch-amerikanischen Physiker Fritz Wolfgang London (1900-1954).

¹⁵⁸ Im Gegensatz zu kovalenten oder Ionenbindung.

¹⁵⁹ S. Lauth und Kowalczyk 2016, S. 27.

¹⁶⁰ Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958) lieferte als Physiker wesentliche Beiträge zur modernen Physik, speziell auf dem Gebiet der Quantenmechanik

¹⁶¹ Die abstoßende Wechselwirkung ist hiernach keine Kraftwirkung im klassischen Sinn, sondern sich durch das Pauli-Ausschließungsprinzip wie eine Kraft bemerkbar machende Wechselwirkung.

Wechselwirkungspotenzial $U(r)$. Dieses Potenzial wird nach seinem Erstbeschreiber Lennard-Jones-Potenzial¹⁶² genannt. Durch Gleichung (4-4) wird es formal beschrieben¹⁶³

$$U(r) = \frac{A}{d^{12}} - \frac{B}{d^6} = 4\varepsilon \left(\left(\frac{s}{d} \right)^{12} - \left(\frac{s}{d} \right)^6 \right) \quad (4-4)$$

mit

- A: Charakterisierende Potenzialstärke der repulsiven Kräfte
- B: Charakterisierende Potenzialstärke der attraktiven Kräfte
- d: Abstand zwischen den Teilchen bzw. Molekülen
- s: Gleichgewichtsabstand
- ε : Tiefe der Potenzialmulde im Gleichgewichtszustand

Werden die repulsiven und attraktiven Wechselwirkungspotenziale über den Abstand der jeweiligen Moleküle in einem Diagramm aufgetragen, so ergibt sich ein Kurvenverlauf wie in Abb. 4-7 dargestellt.

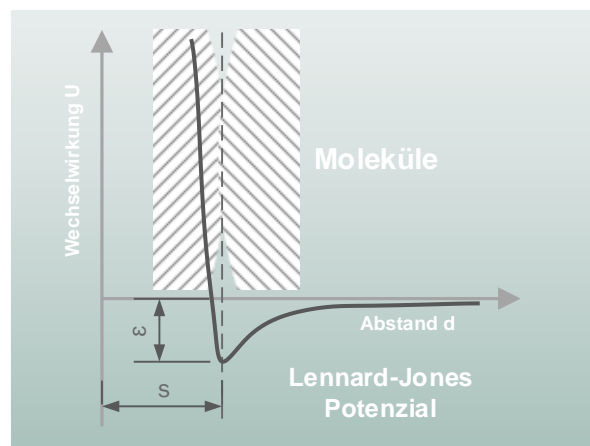


Abb. 4-7: Vereinfachte Darstellung des Lennard-Jones-Potenzials¹⁶⁴

Wichtig in Gleichung (4-4) ist zum einen der Abstand beim Gleichgewicht s und zum anderen die Tiefe der Potenzialmulde ε . Beide Parameter sind materialabhängige Größen. Der Gleichgewichtsabstand ist der Lennard-Jones-Abstand und wird in der Literatur mit $4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$ angegeben. Ausgehend von diesen grundlegenden Modellen zur Beschreibung der Oberflächenwechselwirkungen zwischen einzelnen Molekülen sind Berechnungsansätze entwickelt worden, um die Anziehungskräfte auch auf makroskopischer Ebene analysieren zu können. Ausgang dabei waren vor allem Forschungen auf dem Gebiet der Kolloidphysik und -chemie¹⁶⁵.

Der Ansatz zur Berechnung der Van-der-Waals-Kräfte beruht auf der paarweisen Addition aller Atom- und Molekülkontakten zwischen zwei Körpern. Die gesamte Anziehungskraft ist

¹⁶² S. Popov 2015, S. 29. Sir John Edward Lennard-Jones (1894-1954) war ein britischer Mathematiker und theoretischer Physiker.

¹⁶³ Vgl. Dutschk 2000, S. 31.

¹⁶⁴ Eigene Darstellung. Vgl. Popov 2015, S. 29.

¹⁶⁵ Der Begriff „Kolloid“ wurde erstmals 1861 vom britischen Chemiker Thomas Graham verwendet und wurde aus dem griechischen kolla „Leim“ und eios „Aussehen“ abgeleitet, als er das Diffusionsverhalten verschiedener Salzlösungen untersuchte. Vgl. Lauth und Kowalczyk 2016, S. 3.

somit die Summe aller Dispersionskräfte zwischen den Körpern. Für den Fall einer idealen Kugel auf einer idealen Ebene ergibt sich die gesamte Van-der-Waals-Kraft zu¹⁶⁶

$$F_W(d) = -\frac{A_H R^3}{6d^2(d+R)^3} (R+2d) \quad (4-5)$$

mit

R : Kugelradius

d : Abstand zwischen Kugel und Ebene

A_H : Hamaker-Konstante

Das negative Vorzeichen in (4-5) ist der Konvention des Wechselwirkungspotenzials, wie es in Abb. 4-7 dargestellt ist, geschuldet. Die Stoffeigenschaften und das Interaktionspotenzial der Materialien werden durch die Hamaker¹⁶⁷-Konstante A_H ausgedrückt¹⁶⁸.

$$A_H = \pi^2 C_L \rho_1 \rho_2 \quad (4-6)$$

mit

Atomdichte pro Volumeneinheit der Stoffe 1,2; kann sehr gut abgeschätzt werden

ρ_i : über $\frac{\rho_S N_A}{M_S}$

N_A : Avogadro-Konstante

ρ_S : Stoffdichte

M_S : Molmasse

C_L : London-Konstante¹⁶⁹

Berechnete und experimentell ermittelte Werte für die Hamaker-Konstante können der Literatur entnommen werden. Für Metalle liegt die Konstante im Bereich von $25 - 40 \cdot 10^{-20} \text{ J}$.¹⁷⁰

Dieser Versuch einer Analyse der makroskopischen Beschreibung der Van-der-Waals-Kräfte besitzt den Nachteil, dass der reale Verformungszustand der Körper unberücksichtigt bleibt. Das Modell beschreibt über die Berechnung der Van-der-Waals-Kräfte die Anziehung zweier Körper als berührungslosen Kontaktmechanismus. Es ist naheliegend, dass durch eine Verformung realer Körper eine größere Anzahl an polarisierten Molekülen am Bindungsmechanismus teilnehmen. In Größendimensionen von wenigen Mikrometern ist deshalb die Deformation zu berücksichtigen. Dies ist unter dem Begriff der Adhäsion und der dort beschriebenen Kraftwirkungen beschrieben. Diese werden im folgenden Abschnitt näher erläutert.

4.2.2 Adhäsionskraftmodelle

Die bisherigen Betrachtungen der Oberflächenwechselwirkungen beruhten im Wesentlichen auf Modellbildungen von Teilchen in atomaren und molekularen Dimensionen und de-

¹⁶⁶ Vgl. Prokopovich und Starov 2011, S. 211.

¹⁶⁷ Hugo Christiaan Hamaker (1905-1993) war ein niederländischer Physiker.

¹⁶⁸ Vgl. Hamaker 1937.

¹⁶⁹ Als Ausdruck für die Stärke der attraktiven Interaktion der Stoffe, s. Leite et al. 2012, S. 12777 [$C_L = \frac{3\alpha_0^2 h \nu}{4(4\pi\epsilon_0)^2}$, mit α_0 als Polarisierbarkeit der Moleküle, h des Planck'sches Wirkungsquantum, ν der Grenzfrequenz der Atomwellenfunktion und ϵ_0 der elektrischen Feldkonstante]

¹⁷⁰ S. Israelachvili 2011, 263.

ren physikalischen Zusammenhängen. In diesem Abschnitt werden jetzt Modelle und Mechanismen erläutert, die sich bei einer Gesamtwirkung sehr großer Teilchenanzahl ergeben und damit reale Dimensionen von Körper beschreiben¹⁷¹. Da eine Analyse jeder einzelnen Wechselwirkung mit ihren Nachbarn und deren Gesamtwirkung in annehmbarer Zeit nicht zu realisieren ist, sind verschiedene Rechenmodelle und Vereinfachungen für Kontaktprobleme erstellt worden, um die Bindungskräfte zwischen Partikeln und Oberflächen zu berechnen.

Um die Kontaktkräfte und Bindungsenergien zwischen zwei Körpern berechnen zu können, ist eine Modellbildung des Deformationsverhaltens der Körper erforderlich. Diese ist umfänglich als Hertzsches¹⁷² Kontaktproblem bekannt. Ohne die Berücksichtigung von Deformationen wären Kontaktprobleme und Bindungskraftberechnungen nur punkt- bzw. liniengeometrische Modelle, die in dieser Form in der Natur nicht existieren. Die Materialwissenschaft kennt zur Beschreibung des Verformungsmechanismus vier verschiedene Modelle zum Verhalten von Werkstoffen für einen Normalkraftkontakt: linear-elastische, plastische, elastisch-plastische und viskos-elastische Verformung. Die Materialparameter zur Beschreibung des Verhaltens sind der Elastizitätsmodul und die Poissonzahl¹⁷³. Die Grundlage aller weiteren Theorien zur Beschreibung der Adhäsion beruht auf dem Ausdruck einer durch eine Normalkraft hervorgerufenen Kontaktfläche zwischen zwei Körpern, s. Abb. 4-8 und Gleichung (4-6)¹⁷⁴.

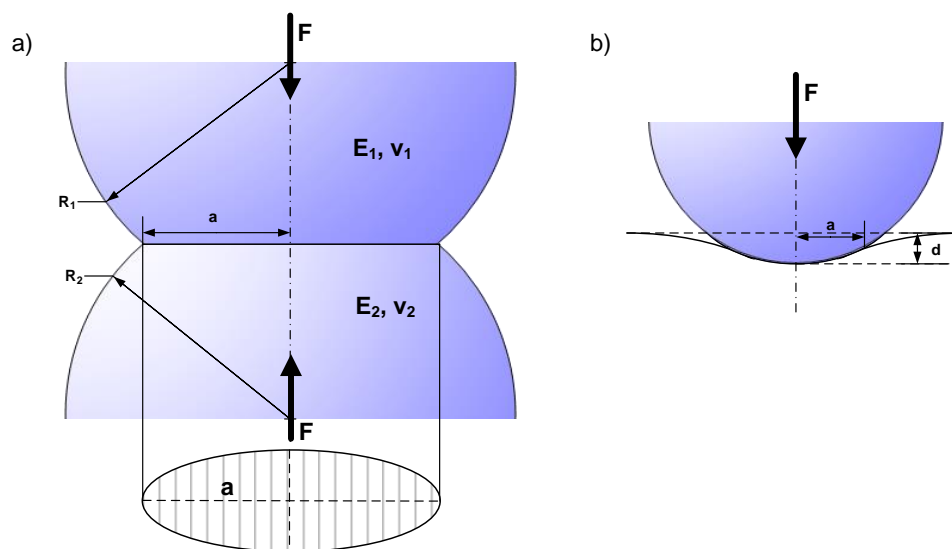


Abb. 4-8: Schematische Darstellung des Hertzschens Kontakts von zwei Kugeln a) und einer starren Kugel mit einem elastischen Halbraum b)¹⁷⁵

¹⁷¹ Auch im Mikrobereich der Analyse bewegt man sich immer noch in der Größenordnung von 10^{20} Teilchen für eine Eisenkugel von $50 \mu\text{m}$ Durchmesser.

¹⁷² Nach dem deutschen Physiker Heinrich Hertz (1857-1894) der vor allem für seine Forschung auf dem Gebiet des Elektromagnetismus Bekanntheit erlangte.

¹⁷³ Siméon Denis Poisson (1781-1840) war ein französischer Physiker und Mathematiker, dessen Arbeiten vor allem auf den Gebieten der Thermodynamik und Stochastik auch heute noch Bestand haben.

¹⁷⁴ Vgl. Prokopovich und Starov 2011, S. 213.

¹⁷⁵ Eigene Darstellung. Vgl. Popov 2015, S. 65.

Alle Berechnungen und Vorhersagen zum Kontakt zweier Körper beruhen auf den Mechanismen einer gleichverteilten Flächenpressung und der dadurch hervorgerufenen Kontaktfläche a_0 . Sie wird bestimmt durch die oben genannten Materialeigenschaften, die Krümmungsradien der Körper und der Normalkraft.

$$a_0^3 = E^* R^* F_N \quad (4-7)$$

mit

F_N : Normalkraft

R^* : Reduzierter Kugelradius; $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

Ausdruck für das mechanische Verformungsverhalten zweier Stoffe;

$$E^* = \frac{3}{4} \pi \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)$$

ν_i : Poissonzahl (auch Querkontraktionszahl genannt)

E_i : Young-Modul (auch Elastizitätsmodul genannt)

Durch die Berechnung der Deformation und der damit einhergehenden Kontaktfläche können nun die adhäsiven Phänomene analysiert und formalisiert werden¹⁷⁶. Das adhäsive Kontaktmodell zur Beschreibung der Bindungskräfte beruht auf der freien Oberflächenenergie kondensierter Materie. Durch die asymmetrischen Kräfteverteilungen an einer Stoffphasengrenze besitzt jeder Körper eine definierte freie Oberflächenenergie $\Delta\gamma$. Sie ist immer positiv und kann auch als benötigte Arbeit zur Trennung der chemischen und physikalischen Bindungen innerhalb eines Stoffes aufgefasst werden. In Abb. 4-9 ist die Oberflächenenergie als Schema veranschaulicht.

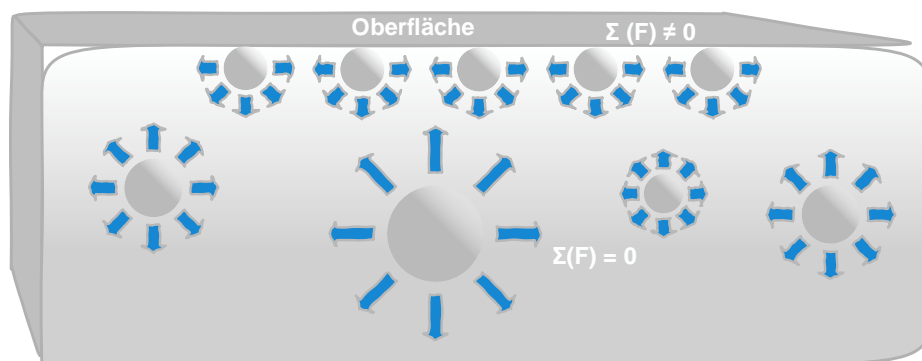


Abb. 4-9: Schematische Darstellung der freien Oberflächenenergie kondensierter Materie¹⁷⁷

Innerhalb eines Körpers wirken repulsive und attraktive Kräfte zwischen den Teilchen in alle Raumrichtungen und gleichen sich in Summe aus. Die Teilchen an der Oberfläche besitzen weniger Freiheitsgrade zur Ausbildung der Bindungen. Dies resultiert in der freien Oberflächenenergie. Sie ist nur von Stoffeigenschaften abhängig. Kommt es zwischen zwei Körpern zum Kontakt, so wirken, die freien Oberflächenenergien als attraktive Kraft. Dieses Modell

¹⁷⁶ Der Begriff »Adhäsion« stammt vom lateinischen Wort *adhaere* ab, das wörtlich mit „an etwas (fest)hängen, kleben“ übersetzt werden kann.

¹⁷⁷ Eigene Darstellung.

wird nach seinen Entdeckern auch JKR-Theorie genannt¹⁷⁸. Der Kontaktflächenradius a_0 in Gleichung (4-7) wird durch die Oberflächenkräfte vergrößert zu a_1 ¹⁷⁹

$$a_1^3 = E^* R \left(F + 3\Delta\gamma\pi R + \left((6\Delta\gamma\pi R F) + (3\Delta\gamma\pi R)^2 \right)^{1/2} \right) \quad (4-8)$$

mit

$\Delta\gamma$ Freier Oberflächenenergie; $\Delta\gamma = \Delta\gamma_1 + \Delta\gamma_2$

$\Delta\gamma_i$ Freie Oberflächenenergie der Stoffe 1,2

F : Äußere Krafteinwirkung

Greift keine äußere Kraft ein, bleibt im Gleichgewicht dennoch eine Kontaktfläche durch die bestehenden Oberflächenkräfte. Mit ($F = 0$) in Gleichung (4-8) zu (4-7) ins Verhältnis gesetzt, sodass die zu überwindende Adhäsionskraft zwischen zwei voneinander zu trennenden, elastischen Kugeln zu Gleichung (4-9) resultiert.

$$F_{JKR} = \frac{3}{2} \pi \Delta\gamma R \quad (4-9)$$

Die JKR-Theorie beschreibt die Adhäsionskräfte, die bei berührendem Kontakt zwischen elastischen Kugeln wirken. Bereits kurze Zeit nach der veröffentlichten Theorie wurde ein zweiter Ansatz der Adhäsion zwischen zwei Körper mittels der freien Oberflächenenergie beschrieben¹⁸⁰. Dieser propagiert eine attraktive Kraft und Deformationsmechanismen bei berührungslosem Kontakt. Dieses als DMT-Theorie bekannt gewordenes Modell sagt eine resultierende Adhäsionskraft durch folgende Gleichung (4-9) voraus.

$$F_{DMT} = 2\pi\Delta\gamma R \quad (4-10)$$

Nach der Veröffentlichung entbrannte eine Diskussion, welche der Theorien die bessere Vorhersage trifft. Zahlreiche wissenschaftliche Experimente zeigten mal größere Übereinstimmung zum JKR-Modell und mal zu DMT.¹⁸¹ Es gelang schließlich, die beiden Theorien als Grenzfälle desselben Problems zu beschreiben, wofür das JKR-Modell für weichere Materialien – also elastische Fälle und größere Deformationen – angewendet werden kann und das Modell von DMT für sehr harte Materialien und somit kleinere Deformationen genauere Vorhersagen über die Adhäsionskräfte trifft¹⁸². Überprüft werden kann dies über den Tabor-Faktor.

¹⁷⁸ Nach K. Johnson, K. Kendall und A. Roberts. S. Johnson et al. 1971.

¹⁷⁹ S. Johnson et al. 1971, S. 307.

¹⁸⁰ S. Derjaguin et al. 1975 Boris Wladimirowitsch Derjagin (1902-1994) war ein russischer Chemiker und Physiker. Die erste Veröffentlichung zum Verhalten von Kolloiden und deren Bildung über Oberflächenkräfte erfolgte bereits 1934. Die anderen Autoren waren Muller und Toporov.

¹⁸¹ S. Mittal und Jaiswal 2015, 83ff.

¹⁸² S. Tabor 1977.

$$\mu_T = \left(\frac{r\Delta\gamma}{E^*H_0^3} \right)^{1/3} \quad (4-11)$$

mit

r : Radius der Kontaktraugigkeit (Asperiten)

H_0 : Minimalabstand zwischen den Oberflächen (intermolekularer Abstand nach Lennard-Jones-Potenzialfunktion ($H_0 = 0,3 \cdot 10^{-9}m$))

Der Tabor-Faktor bezieht sich auf den realen Kontakt eines Körpers, das heißt, dass keine ideal-glatten Oberflächen vorliegen, sondern diese über Mikrorauheiten verfügen. Die Geometrie und Materialeigenschaften der Kontaktkörperasperiten¹⁸³ sind entscheidend, ob das Adhäsionskraftmodell nach JKR oder DMT genauere Resultate liefert. Ist $\mu_T < 1$ (4-11), so liefert (4-10) bessere Werte – im Falle $\mu_T > 1$ wird die Adhäsionskraft nach der JKR-Theorie bestimmt (4-11).

Die mathematische Beschreibung des Tabor-Faktors und damit der richtige Ansatz zur Bestimmung der Adhäsionskraft weist über die Einflussnahme der Asperitenradien bereits auf einen Umstand hin, dem bisher in der Modellbildung keine Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Die oben genannten Modelle und Theorien gehen von idealisierten glatten Oberflächen beim Kontakt aus. Die Realität stimmt mit einer solchen Annahme jedoch nicht überein. Vielmehr weisen selbst technisch perfekt bearbeitete Glaskugeln Mikro- oder Nanoasperiten auf, die die Adhäsionsmechanismen entscheidend beeinflussen¹⁸⁴.

Die Adhäsionstheorien auf Basis der freien Oberflächenenergien benötigen zur genauen Berechnung die Kontaktfläche zwischen den Oberflächen. Dies ist gerade im Bereich der Mikrorauheit und noch kleineren Skalen nur mit sehr großem Messaufwand oder ungenauen Abschätzungen verbunden. Aus diesem Grund wurde ein zusammenführendes Modell von geometrisch exakt zu beschreibenden Van-der-Waals-Kräften und Adhäsionskräften zur Berücksichtigung der Deformationsmechanismen veröffentlicht¹⁸⁵. Zunächst wurde in einem ersten Modell eine mathematische Beschreibung der Oberflächenrauheit von Partikeln gegeben und diese überführt in die Hamaker-Theorie zur Berechnung der attraktiven Oberflächenkräfte. Dieses Modell wurde erweitert durch die entsprechende Oberflächenvergrößerung nach dem JKR-Modell zu einer adhäsiven Gesamtkraft $F_{ad\ Rab}$ (4-12).

$$F_{ad\ Rab} = \frac{2\pi\Delta\gamma Rr_2}{(r_2 + R)} + \frac{A_H R}{6H_0^2} \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{58Rrms_2}{\lambda_2^2} \right)} + \frac{1}{1 + \left(\frac{58Rrms_1}{\lambda_1^2} \right) \left(1 + \frac{1,82rms_2}{H_0} \right)^2} + \frac{H_0^2}{(1 + 1,82(rms_1 + rms_2))^2} \right] \quad (4-12)$$

mit

r_2 : Radius der Kontaktraugigkeit (Asperiten)

R : Partikelradius

rms_i : Rauheit (root mean square); Mittlere Quadratische Asperitenhöhe $rms = 0,0172\lambda^2/r$.

¹⁸³ Asperiten sind die höchsten Rauheitsspitzen, die in Kontakt mit der Oberfläche des anderen Körpers treten.

¹⁸⁴ S. LaMarche et al. 2017, S. 142.

¹⁸⁵ S. Rabinovich et al. 2000b, 2000a.

- λ_i : Abstände der Asperiten der jeweiligen Rauheitsskalen 1,2
 H_0 : Minimalabstand zwischen den Oberflächen (intermolekularer Abstand nach Lennard-Jones-Potenzialfunktion ($H_0 = 0,3 \cdot 10^{-9}m$))

Der erste Term entspricht dabei der Adhäsionskraft $F_{ad\ JKR}$ nach (4-9). Der zweite Term ist eine Berechnung der Van-der-Waals-Kräfte nach der Hamaker-Theorie (4-5). Der wichtige Ansatz des Modells ist die geometrische Beschreibung der Oberflächenstruktur des Partikels. Die Rauheit führt dazu, dass die Kontaktfläche gegenüber einem ideal glatten Partikel deutlich reduziert wird. Dazu führen die mathematischen Terme in eckigen Klammern. Ein beliebig geformter Partikel wird überführt in eine äquivalente Überlagerung von regelmäßigen Rauheiten unterschiedlicher Skalen. Dieser Sachverhalt ist in Abb. 4-10 verdeutlicht. Über die jeweiligen maximalen Asperitenhöhen $y_{2\ max}$ und die Abstände der einzelnen Asperiten λ_2 lassen sich die mikroskaligen Kontakte beschreiben. In den meisten aller Fälle findet sich eine weitere größerskalige Rauheit, um die Kontakte zwischen Partikeln und einer Oberfläche zu definieren. Diese ist mathematisch beschrieben durch die maximale Höhe $y_{1\ max}$ und einen Abstand zwischen den Rauheitsmaxima λ_1 . Sollte der Abstand zwischen den großskaligen Rauheiten λ_1 in die Größenordnung des Partikelradius R liegen, entfällt der dritte Term in der Klammer von (4-12)¹⁸⁶.

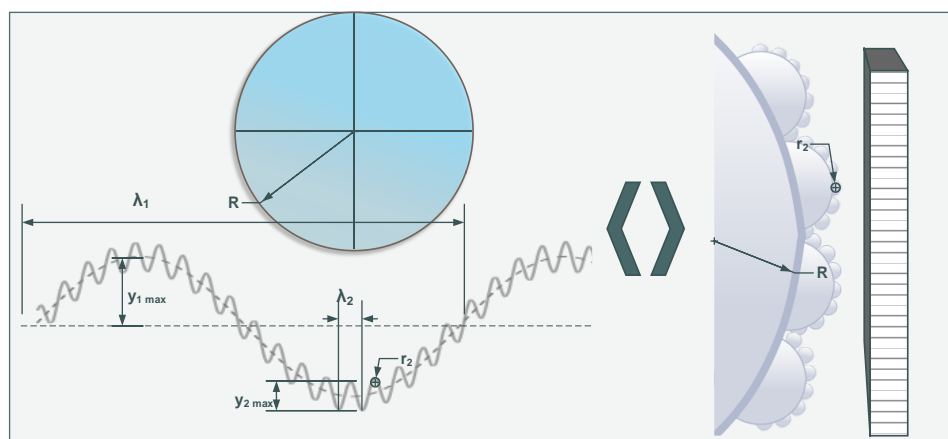


Abb. 4-10: Schematische Darstellung der Rauheiten und geometrischen Größen zur mathematischen Beschreibung des Partikelkontakts mit einer Oberfläche, wobei es keinen Unterschied macht, ob dem Partikel oder der Oberfläche (oder ggf. einer Resultierenden aus beiden) eine Rauheit zugewiesen wird¹⁸⁷

Über eine Verhältnismäßigkeit von den Asperitenhöhen und deren Abständen zu einander lassen sich analytische Lösungen finden, zur Abwertung der Kontaktflächen durch die bestehenden Rauheiten. Des Weiteren wird erläutert, dass zur Berechnung der Kontaktfläche über die unterschiedlichen Rauheiten deren Auftreten – also Partikel oder Bauteiloberfläche – keine Rolle spielt. Bereits beim Hertzschen Kontaktproblem wurde gezeigt, dass es unerheblich ist, ob eine starre Kugel in einen elastischen Halbraum eindringt, oder eine elastische Kugel auf einer starren Oberfläche deformiert wird¹⁸⁸. Durch die Überlagerung der Rauheiten kann das

¹⁸⁶ S. Rabinovich et al. 2000a, S. 21

¹⁸⁷ Eigene Darstellung. Vgl. Kumar et al. 2013, S. 216.

¹⁸⁸ S. Hertz 1882.

Problem immer zurückgeführt werden auf einen Kontakt von beliebigen Partikel auf glatter Oberfläche.

4.2.3 Grenzflächenspannung fluider Phasen an festen Oberflächen

Nachdem die Haftkräfte von Partikeln hergeleitet wurden, müssen die besonderen Eigenschaften von Fluiden und deren grundsätzliche Bindungsmechanismen auf einer festen Oberfläche untersucht werden. Es wurden verschiedene Theorien postuliert, um die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der Vielzahl von Fluiden beschreiben zu können.

Wie bereits im vorigen Abschnitt zur Beschreibung der freien Oberflächenenergie abgeleitet wurde, besitzt die Oberfläche von fester und fluider Materie ein asymmetrisch verteiltes Kräftegleichgewicht der Moleküle an der Phasengrenze bzw. Oberfläche, s. Abb. 4-9. Dieser Umstand führt dazu, dass bei einer gewünschten Änderung der Oberfläche die Materie Arbeit verrichten muss, um die Dispersionsenergie der Moleküle U_{Disp} zu überwinden¹⁸⁹. Das Maß aus dem Verhältnis der Änderungsarbeit zu seiner jeweiligen Oberfläche wird Oberflächenspannung genannt, s. Gleichung (4-13).¹⁹⁰

$$U_{Disp} = \frac{A}{O} = \sigma \quad (4-13)$$

mit

A: Änderungsarbeit des Phasenvolumens

O: Oberfläche

Wird eine flüssige Phase auf eine feste Oberfläche gebracht, so wirken die durch die Grenzflächenspannungen verursachten Kräfte so lange, bis ein Kräftegleichgewicht herrscht. Das Gleichgewicht ist phänomenologisch von den Grenzflächenspannungen zwischen den Materialien abhängig. Eine schematische Darstellung mit Kennzeichnung der physikalischen Größen zeigt Abb. 4-11 a).

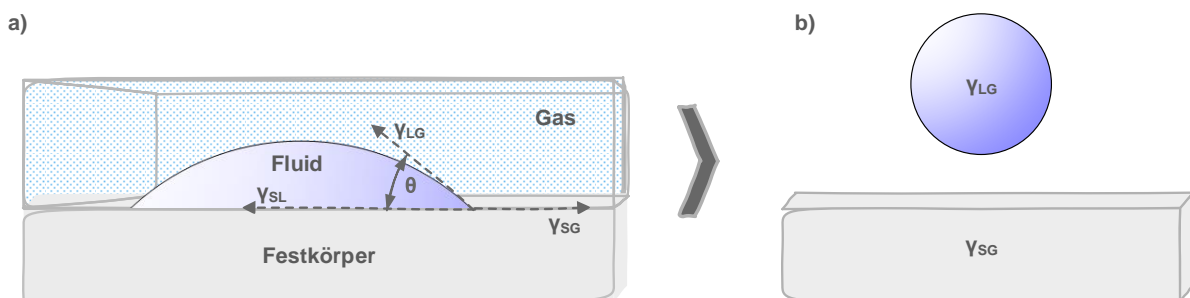


Abb. 4-11: a) Flüssigkeitstropfen auf einer Festkörperoberfläche; b) Flüssigkeitstropfen von der Oberfläche getrennt; Indizes: S=solid (fest), L=liquid (flüssig), G=gas (gasförmig)¹⁹¹

¹⁸⁹ S. Lauth und Kowalczyk 2016, S. 56.

¹⁹⁰ Im Falle von Flüssigkeiten wird der Begriff Oberflächenspannung und der kleine griechische Buchstabe σ verwendet. Bei Festkörpern spricht man von der freien Oberflächenenergie und nutzt γ als Formelzeichen. In beiden Fällen ist der Begriff Grenzflächenspannung korrekt.

¹⁹¹ Eigene Darstellung. Vgl da Silva et al. 2011, S. 50.

Zunächst untersucht und später formal beschrieben werden, kann das Kräftegleichgewicht durch die Young¹⁹²-Gleichung (4-14).

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \Leftrightarrow \gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cos \theta \quad (4-14)$$

mit

$\cos \theta$: Kontaktwinkel

γ_{SG} : Grenzflächenspannung zwischen fester und gasförmiger Phase

γ_{SL} : Grenzflächenspannung zwischen fester und flüssiger Phase

γ_{LG} : Grenzflächenspannung zwischen flüssiger und gasförmiger Phase

Für das Ziel im Sinne der Bauteilreinigung, die feste und die flüssige Phase voneinander zu trennen, muss Arbeit verrichtet werden. Diese Arbeit wird als Adhäsionsarbeit W_A bezeichnet und berechnet sich durch die Young-Dupre¹⁹³-Gleichung (4-15).

$$W_A = \gamma_{SG} + \gamma_{LG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG}(1 + \cos \theta) \quad (4-15)$$

Die Bestimmung der Adhäsionsarbeit kann durch die Kontaktwinkelmessung der Flüssigkeit auf der Festkörperoberfläche erfolgen. Mittlerweile stellt die Kontaktwinkelmessung ein in der Praxis einfach zu handhabendes Prüfverfahren dar. Die sich einstellenden Winkel sind dabei stark von Umgebungsbedingungen abhängig: Oberflächenbeschaffenheit, polare und nicht-polare Anteile, Moleküle in der festen und flüssigen Phase, kondensierender Wasserdampf bei Messungen in Luftumgebung, Temperatur u.v.m. müssen ggf. berücksichtigt werden. In Abhängigkeit der verschiedenen Materialpaarungen, die voneinander zu trennen¹⁹⁴ sind, wurden entsprechende Methoden entwickelt, um die jeweilige Adhäsionsarbeit zu bestimmen¹⁹⁵.

4.2.4 Solid-Liquid-Solid Materialpaarungen

Die vorigen beiden Abschnitte betrachteten die Phänomene zur Berechnung der Bindungen zwischen zwei Festkörpern und zwischen einer flüssigen Phase und einem Festkörper. Wie oben erläutert, ermöglichen diese Modelle die Analyse von partikulären und filmischen Verunreinigungen. In der technischen Praxis ist es häufig so, dass diese Verunreinigungsarten kombiniert auftreten. Das Zusammenwirken der Verunreinigungen soll als Solid-Liquid-Solid-Bindung bezeichnet werden. In Abb. 4-12 ist diese Materialpaarung schematisch dargestellt.

¹⁹² Thomas Young (1773-1829) war ein britischer Augenarzt und Physiker.

¹⁹³ Athanase Louis Victoire Dupré (1808-1869) war ein französischer Mathematiker und Physiker.

¹⁹⁴ Der inverse Vorgang, dass eine Flüssigkeit bestmöglich eine feste Oberfläche benetzen soll, ist in der technischen Anwendung ebenso wichtig, wie herausfordernd.

¹⁹⁵ Die Fowkes-Methode (s. Fowkes 1963) und daraus entstandene Weiterentwicklungen (Wu 1971; Good et al. 1990) zur Würdigung von polaren und unpolaren Molekülgruppen und die OWRK-Methode (Owens und Wendt 1969; Rabel 1971; Kaelble 1970) zur Unterscheidung von dispersen und polaren Bindungsmechanismen.

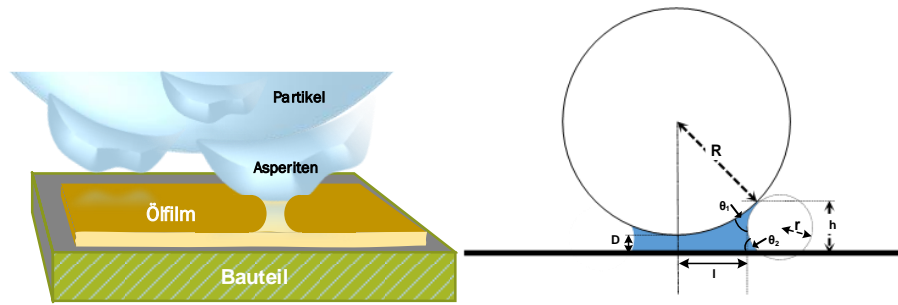


Abb. 4-12: Ausbildung eines Meniskus beim adhäsiven Kontakt von Partikel und Ölfilm auf einer festen Oberfläche (li.); (re.) die wichtigsten geometrischen Größen zur mathematischen Beschreibung¹⁹⁶

Werden die Adhäsionskräfte des Kontakts von Partikel zu Oberfläche überwunden, bilden sich ausgehend vom Flüssigkeitsfilm kleine Liquidbrücken in Form von Menisken aus. Die dabei herrschende Kraft, die die Flüssigkeitsbrücke zusammenhält, wird als Kapillarkraft bezeichnet. Die Ausbildung und Formgebung der Flüssigkeitsbrücke zu einem Meniskus lässt sich aus der Young-Laplace¹⁹⁷-Gleichung (4-16) ableiten¹⁹⁸.

$$\Delta P = \gamma_L \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (4-16)$$

mit

ΔP : Differenzdruck zwischen dem Druck innerhalb und außerhalb einer Fluidphase

r_i : Krümmungsradien

Die Gleichung beschreibt den Zusammenhang der Änderungsarbeit zur Oberflächen- und Volumenänderung¹⁹⁹. Die Differenzdruckänderung kann bei der Ausbildung eines Meniskus zwischen einem Partikel und der Oberfläche als Abstandsänderung aufgefasst werden. Wie bereits gezeigt wurde, besteht eine reale Oberfläche immer aus gekrümmten Asperitenhöhen einer mittleren Rauheit. Die Kapillarkraft und der Meniskus bilden sich zwischen zwei gekrümmten Körpern aus. Zur Berechnung der Adhäsionskraft durch die Kapillare $F_{ad\ cap}$ ist der mathematische Zusammenhang gegeben durch Gleichung (4-17).²⁰⁰

$$F_{ad\ cap} = 2\pi\gamma_L R^* (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (4-17)$$

mit

θ_i : Kontaktwinkel der Flüssigkeit mit den jeweiligen gekrümmten Asperitenoberflächen 1;2

Mit ausreichender Genauigkeit lässt sich die Gleichung im Falle von gleichen Materialien und ähnlichen Mikrorauheiten (4-17) vereinfachen zu $F_{ad\ cap} = 4\pi\gamma_L R^* (\cos \theta)$.

¹⁹⁶ Eigene Darstellung.

¹⁹⁷ Pierre-Simon Laplace (1749-1827) war französischer Mathematiker, Physiker und Astronom der insbesondere für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Stochastik und Analysis bekannt ist.

¹⁹⁸ S. Butt und Kappl 2018, S. 132.

¹⁹⁹ Wird eine Fluidkugel (ausreichend klein, oder bei fehlender Gravitation) in ihrem Volumen und der Oberfläche verändert, so muss eine Arbeit verrichtet werden. Setzt man die Volumenänderungsarbeit ($dW = p dV = p 4\pi r^2 dr$) und die Oberflächenänderungsarbeit ($dW = \gamma dA = \gamma 8\pi r dr$) gleich, erhält man die in Gleichung (4-16) angegebene Beziehung mit $r = r_1 = r_2$.

²⁰⁰ S. Butt und Kappl 2018, S. 144.

4.3 Technische Sauberkeit

Nachdem in den vorigen Unterkapiteln die grundlegenden Mechanismen und mathematische Formalien erarbeitet wurden, die bei Kontakt zwischen flüssigen und festen Phase auftreten, sollen nun die technischen Randbedingungen beschrieben werden, auf die die theoretischen Methoden und Modelle angewendet werden sollen. Dabei soll sich an den Definitionen für das Fertigungsverfahren Reinigen²⁰¹ orientiert werden: „Reinigen ist Entfernen unerwünschter Stoffe (Verunreinigungen) von der Oberfläche von Werkstücken bis zu einem erforderlichen, vereinbarten oder möglichen Grad.“ Der erforderliche, vereinbarte oder mögliche Grad stellt dabei die technische Sauberkeit dar.

4.3.1 Sauberkeitsspezifikation

Stellen Verunreinigungen für ein technisches System eine Gefahr für dessen Funktionalität dar, so können Sauberkeitsspezifikationen (oder auch Sauberkeitsgrenzwerte) sinnvoll sein.²⁰² Da es sich bei der technischen Sauberkeit um ein probabilistisches System handelt, bei dem sowohl Auftreten als auch Wirkung der Verunreinigungen von stochastischen Gesetzmäßigkeiten abhängen, sind Sauberkeitsspezifikationen eher als Prozesseingriffsgrenzen wider Toleranzgrenzen zu verstehen. Wie für ein Bauteil eine Sauberkeitsspezifikation erstellt werden kann, ist dem Ablaufschema der Abb. 4-13 zu entnehmen.

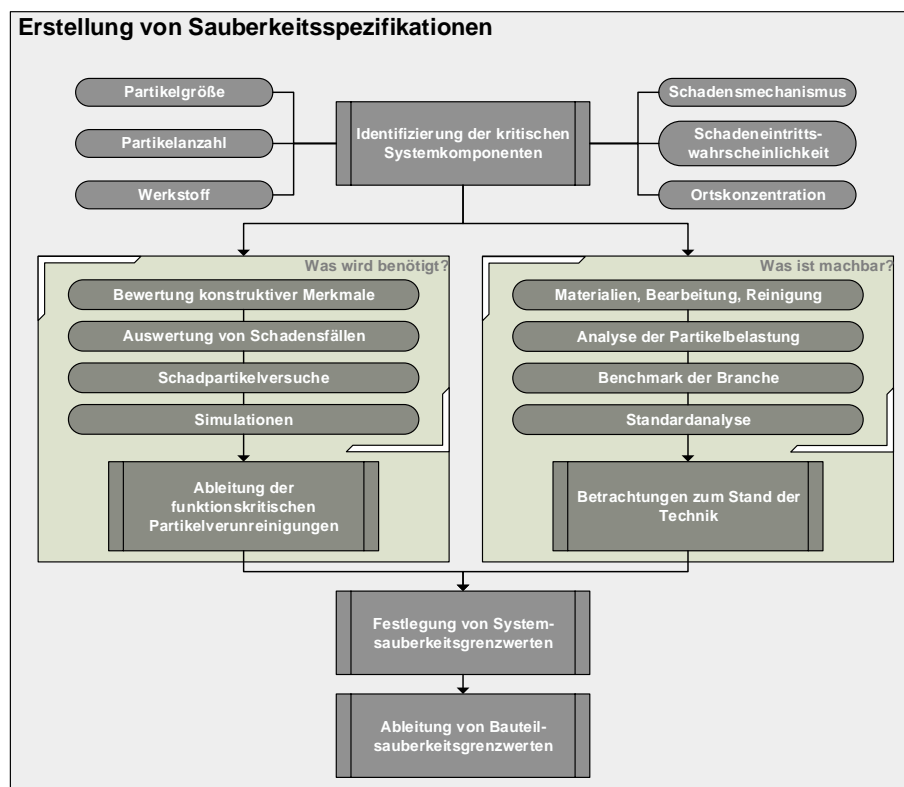


Abb. 4-13: Ablauf zur Erstellung einer Sauberkeitsspezifikation²⁰³

²⁰¹ S. DIN 8592, S. 3.

²⁰² Vgl. VDA-Richtlinie 19.1, S. 18.

²⁰³ Eigene Darstellung. Vgl. VDA-Richtlinie 19.1, S. 20.

Zu Beginn steht die Aufgabe, die für Verunreinigungen kritischen Systemkomponenten zu identifizieren. Darin enthalten ist eine Partikel- und Schadensanalyse. Anschließend müssen durch vier Schritte (Konstruktionsbewertung, Schadfallauswertung, Partikelversuche und Simulation) die funktionskritischen Partikelverunreinigungen abgeleitet werden. Neben der Analyse der kritischen Verunreinigung soll der Stand der Technik betrachtet werden, mit der Maßgabe, machbare Lösungen zu finden. Dieser Prozess mündet in der Festlegung von Systemsauberkeitsspezifikationen. Darüber lassen sich dann für alle Bauteile des Systems eigene Sauberkeitsgrenzwerte definieren.²⁰⁴

Ist der Sauberkeitsgrenzwert ein Ausschlusskriterium, so ist die Spezifikation durch „kein Partikel größer X“ zu formulieren. Dieser Wert gilt für alle Bauteile im System. Bei maximalen Mengen oder Partikelgrößenverteilungen summieren sich die Einzelgrenzwerte der Bauteile zum Systemgrenzwert. Die Bauteilgrenzwerte lassen sich dabei durch geeignete Kriterien wie Flächenbeteiligung, Reinigbarkeit und Relevanz gewichten. Formal ausgedrückt ist der Systemgrenzwert somit zu ermitteln durch (4-18).

$$\begin{aligned}
 GW_{ges} &= \sum_i^n GW_{Teil\ i} \\
 &= GW_{ges} \sum_i^n (A_{ges} - A_{Teil\ i}) \\
 &= GW_{ges} \sum_i^n X_i (A_{ges} - A_{Teil\ i}) + B + C + \dots
 \end{aligned}
 \tag{4-18}$$

mit

GW_{ges} :	Gesamtgrenzwert des Systems
$GW_{Teil\ i}$:	Gesamtgrenzwert des Bauteils i
A_{ges} :	(medienberührte) Fläche des Systems
$A_{Teil\ i}$:	(medienberührte) Fläche des Bauteils i
X_i :	Bauteilspezifische Gewichtungsfaktoren
$B, C \dots$:	Weitere additive Schmutzmengen

Die medienberührte Fläche entspricht im Fall von strömungstechnischen Systemen, wie Hydraulik, Treibstoffsysteme o.ä., der Fläche des jeweiligen Bauteils, die tatsächlich im arbeitenden System mit dem Medium in Kontakt steht.

4.3.2 Partikelgrößenverteilung und Partikelhäufigkeitsklassen

Wie in Abschnitt 4.1.1 erläutert, werden Partikel nach ihren geometrischen Eigenschaften quantifiziert. Die Bestimmung und Beurteilung der Sauberkeit erfolgt nach Prüfvorgaben, die sich in der Praxis als Bauteilsauberkeitscodes (CCC – engl. für Component Cleanliness Code) etabliert haben.²⁰⁵ Danach wird die ermittelte Schmutzmenge bestimmten Größenklassen zugeordnet, s. Tab. 4-1.

²⁰⁴ Eine genauere Anleitung zur Erarbeitung der einzelnen Prozessschritte kann VDA-Richtlinie 19.1, S. 21–23 entnommen werden

²⁰⁵ S. VDA-Richtlinie 19.1; ISO 16232-10.

Tab. 4-1: Partikelgrößenklassen²⁰⁶

Größenklasse	Größe x [μm]
B	$5 \leq x < 15$
C	$15 \leq x < 25$
D	$25 \leq x < 50$
E	$50 \leq x < 100$
F	$100 \leq x < 150$
G	$150 \leq x < 200$
H	$200 \leq x < 400$
I	$400 \leq x < 600$
J	$600 \leq x < 1000$
K	$1000 \leq x < 1500$
L	$1500 \leq x < 2000$
M	$2000 \leq x < 3000$
N	$3000 \leq x$

Die Verunreinigungsmenge wird in definierte Konzentrationen eingeteilt. Die maximale Anzahl an Partikeln für jede Konzentrationsklasse ist im Diagramm in Abb. 4-14 wiedergegeben.

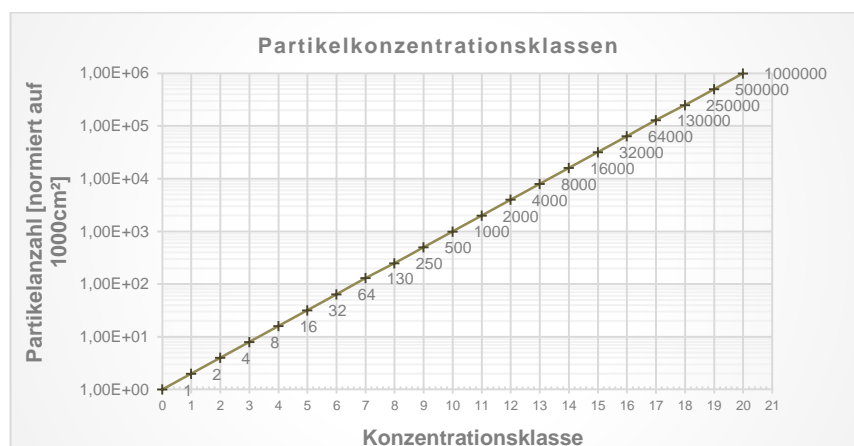


Abb. 4-14: Maximale Anzahl an Partikeln für die einzelnen Konzentrationsklassen; die Ordinatenachse ist logarithmisch skaliert²⁰⁷

Die Partikelanzahl wird auf eine Bezugsfläche von 1000 cm² oder ein Bezugsvolumen von 100 cm³ normiert. Müssen sehr große Bauteile spezifiziert werden, so kann die Normierung entfallen. Alle Schmutzmengen jeder Größenklasse werden überführt in den CCC. Mit der Angabe der verwendeten Bezugsgröße gibt der CCC somit eine Sauberkeitsspezifikation als Partikelgrößenverteilung wieder.

²⁰⁶ S. VDA-Richtlinie 19.1, S. 211.

²⁰⁷ Eigene Darstellung

$$CCC = A (B20/C15/D13/ \dots) \quad (4-19)$$

Im Beispiel (4-19) wurden auf einem Bauteil somit $0,5 - 1,0 \cdot 10^6$ Partikel $\leq 15 \mu\text{m}$ auf einer Fläche von 1000 cm^2 detektiert.

4.3.3 Restschmutzanalyse

Die Prüfung der technischen Sauberkeit wird im Allgemeinen unter dem Begriff der Restschmutzanalyse gefasst. Die Prüfung erfolgt nach einem normierten Protokoll, nach dem die Extraktion der Verunreinigung, mögliche Filtrationsverfahren zur Aufbereitung der Probeentnahme und die sich anschließende Analyse festgelegt sind. Auch hier haben sich die genannten Normen als Standard etabliert.²⁰⁸

Das Prüfverfahren der Restschmutzanalyse sieht den in Abb. 4-15 gezeigten Ablauf vor. Erster Schritt ist die Extraktion der Verunreinigungen von dem Bauteil. Anwendungsspezifisch nach Art der Verunreinigung, der Geometrie und des Aufwands können verschiedene Methoden genutzt werden.²⁰⁹ Die Analysefiltration hat die Aufgabe die Verunreinigungen vom Extraktionsfluid zu trennen, damit diese in der Analyse nach festgelegten Kriterien bzw. Eigenschaften – wie Größe, Form, Glanz – untersucht werden können.

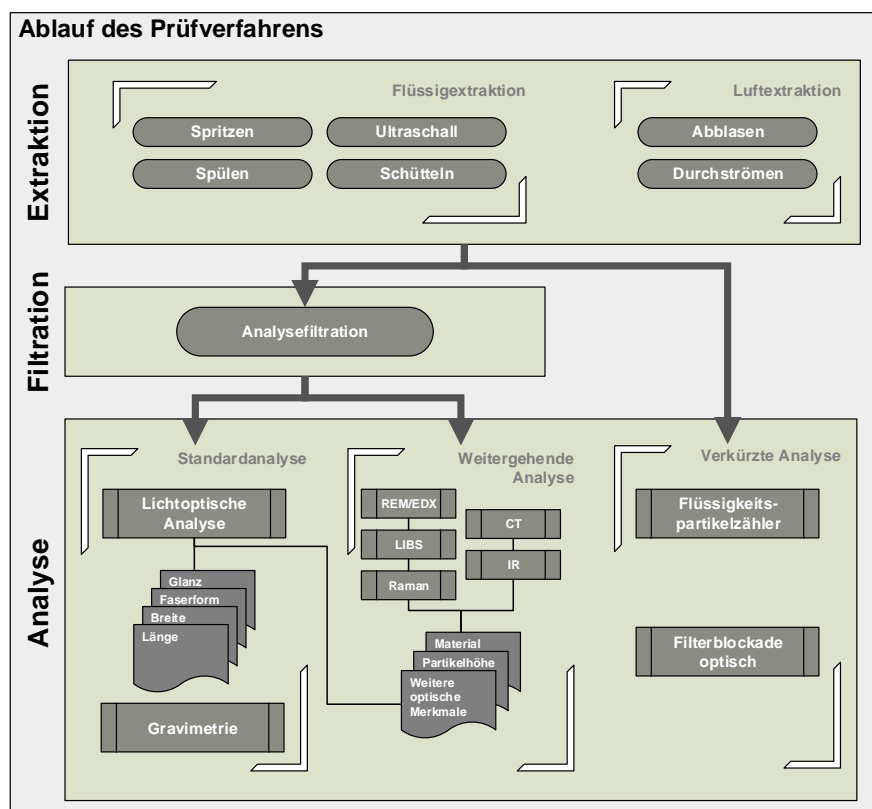


Abb. 4-15: Prüfverfahren zur technischen Sauberkeit²¹⁰

²⁰⁸ Siehe Fußnote 107, oben.

²⁰⁹ S. VDA-Richtlinie 19.1, 72ff.

²¹⁰ Eigene Darstellung. Vgl. VDA-Richtlinie 19.1, S. 17.

Diese Prüfnorm umfasst bisher nur die Analyse von partikulären Verunreinigungen. Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Erläuterung zur Prüfung von filmischen Verunreinigungen.

4.3.4 Oberflächenspannung

Für die Bestimmung der Oberflächenspannung, wie sie zur Berechnung der adhäsiven Kräfte von filmischen Verunreinigungen notwendig ist, sind verschiedene Methoden entwickelt worden, die sich in ihrer Präzision, praktischer Handhabung und Kosten unterscheiden. Die am häufigsten zum Einsatz kommenden Verfahren sind²¹¹

- Tintentests
- Kontaktwinkelmessung
 - Dynamische Wilhelmy²¹² Methode
 - Sessile Drop Methode

Bei dem Tintentestverfahren werden verschiedene eingefärbte Testflüssigkeiten definierter Oberflächenspannung auf die Festkörperoberfläche gestrichen. Je nach Benetzungsverhalten kann die freie Oberflächenenergie abgeschätzt werden. Hierbei handelt es sich um ein einfaches Verfahren mit geringer Genauigkeit.

Um die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit über den Kontaktwinkel zu ermitteln, eignet sich die dynamische Wilhelmy Methode. Dabei wird eine Platte definierter Oberflächeneigenschaften in die zu untersuchende Flüssigkeit getaucht, s. Abb. 4-16.

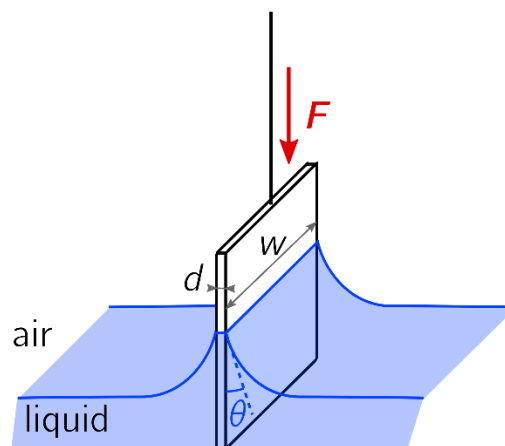


Abb. 4-16: Schema der Wilhelmy Methode; Eine Platte der Breite d wird in die Flüssigkeit getaucht. Die benötigte Kraft F zum Eintauchen wird gemessen.²¹³

Durch die gemessene Kraft bei gegebener Eintauchtiefe und Kontaktwinkel lässt sich die Oberflächenspannung berechnen. Mit der Sessile Drop Methode wird die Grenzflächenspannung bzw. Oberflächenenergie von nicht porösen Festkörpern gemessen. Eine oder auch zwei

²¹¹S. Bilz et al. 2013, S. 45; Shang et al. 2008, S. 299.

²¹²Ludwig Ferdinand Wilhelmy (1812-1864) war ein deutscher Chemiker und Physiker, der wichtige Beiträge zur Quantifizierung der chemischen Reaktionskinetik veröffentlichte.

²¹³Bildquelle: Vincent Émyde; „Scheme of the Wilhelmy plate, which is used to measure the surface tension of a liquid-air interface“; CC0 1.0

Testflüssigkeiten mit definierten Eigenschaften werden auf die Oberfläche getropft. Der entstehende Tropfen und dessen Kontaktwinkel weisen über die Gleichung (4-14) die Oberflächenspannung aus. In Abb. 4-17 ist die Aufnahme eines Tropfens auf eine Oberfläche dargestellt.

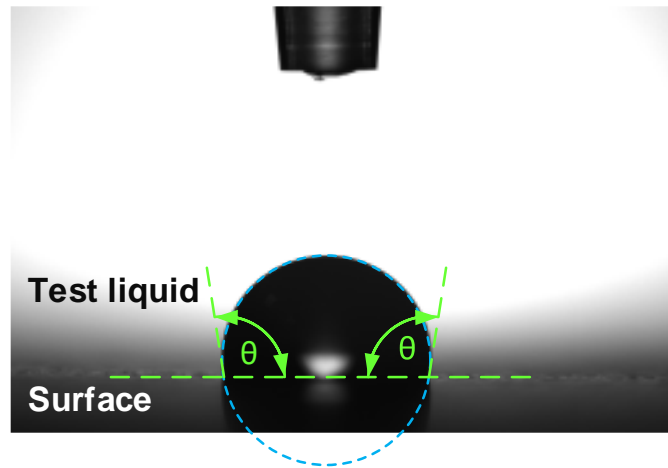


Abb. 4-17: Kontaktwinkelmessung²¹⁴

Zur Orientierung sind in Tab. 4-2 Oberflächenspannungen verschiedener Materialien zusammengefasst.

Tab. 4-2: Oberflächenspannungen verschiedener Werkstoffe²¹⁵

Werkstoff	Oberflächenspannung $\Delta\gamma$ [mN/m]	Kontaktwinkel Wasser θ [°]
Polypropylen (PP)	29,7	95
Polytetrafluorethylen (PTFE)	20,0 - 21,8	105 - 120
Polyethylenterephthalat (PET)	40,9 - 42,4	76,5
Aluminium	1200	< 20
Eisen	2000	< 15
Wolfram	4000	< 10

4.3.5 Mikrostruktur von Bauteilen

Die Oberflächenrauheit der Bauteile muss bei der Ermittlung der Bindungskräfte ebenfalls berücksichtigt werden. Die theoretische Kontaktfläche zwischen einem rauen Partikel und einer planen Fläche muss durch die Rauheitsstruktur der Bauteiloberfläche reduziert werden. Die Berechnung erfolgt nach einem Ansatz von Rabinovich zur Überlagerung verschiedener Rauheiten mit Gleichung (4-20).²¹⁶

$$rms_{ges} = \sqrt{rms_p^2 + rms_c^2} \quad (4-20)$$

²¹⁴ Bearbeitetes Bild. Bildquelle: Jyrkorpela, „Contact angle measurement“; CC BY-SA 4.0

²¹⁵ S. Vitos et al. 1998.

²¹⁶ Vgl. Rabinovich et al. 2000a, S. 20.

mit

rms_{ges} :	Gesamtrauheit
rms_p :	Rauheit des Bauteils
rms_c :	Rauheit des Partikels

Die berechnete Rauheit kann dann in der Gleichung (4-12) verwendet werden. Für die werkstofftechnische Analyse existieren verschiedene Maße zur Quantifizierung der Rauheit von Bauteiloberflächen, dargestellt in Abb. 4-18. Zur Berechnung eignet sich die arithmetische Mittenrauheit R_a , da sie die von der Profilmittellinie ausgehenden Rauheitshöhen abbildet.

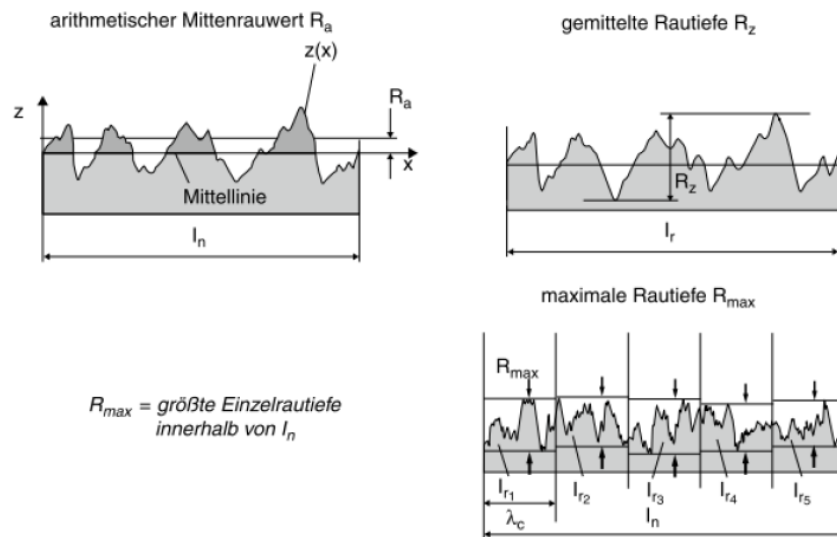


Abb. 4-18: Schematische Darstellung der verschiedenen Rauheiten zur Beurteilung der Oberflächenstruktur von Drehteilen²¹⁷

4.4 Partikelanalyse

Damit eine Berechnung der Haftkräfte nach den in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Modellen gelingen kann, müssen die entsprechenden geometrischen Eigenschaften und Größen analysiert und ermittelt werden. Dazu müssen die Formen der Partikel bestimmt werden, da hierüber die großskaligen Rauheitsparameter bestimmt werden können. Anschließend kann die Feinstruktur ermittelt werden, um die Mikrorauheit zu erfassen und das Kontaktproblem vollständig zu beschreiben. Auch wurde bereits erläutert, dass die Eigenschaften von Verunreinigungen probabilistischen Gesetzmäßigkeiten folgen. Hierzu werden entsprechende mathematische Modelle eingeführt, um die Ganzheit an Partikeln auf einem Bauteil erfassen zu können.

4.4.1 Geometrische Formanalyse

Geometrische Beschreibungen von Partikel sind vor allem im Bereich der Kolloidanalyse, Sedimentwissenschaften und der Pulvermetallurgie bekannt. Die Vielzahl der verschiedenen

²¹⁷ Bildquelle: Petruschke, L. (Masterthesis, TU Darmstadt). Die Erlaubnis zur Verwendung in dieser Arbeit wurde erteilt.

Partikelformbeschreibungen kann in eine Systematik gebracht werden, die in Abb. 4-19 dargestellt ist.

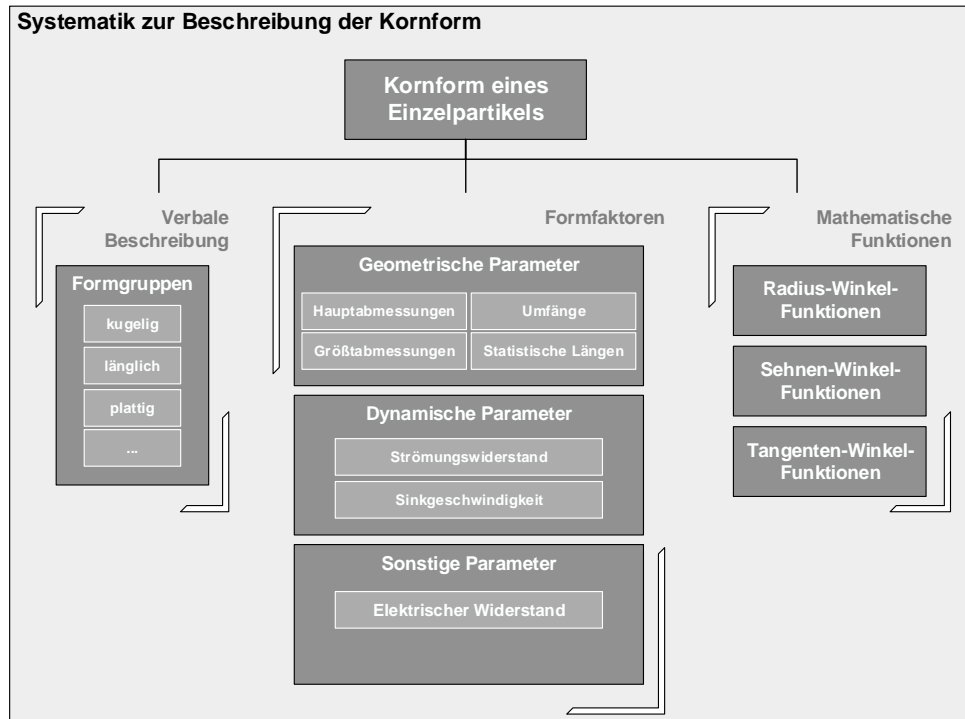


Abb. 4-19: Systematik zur Beschreibung der Kornform eines Einzelpartikels²¹⁸

Grundsätzlich kann die Form von Partikeln mittels drei verschiedener Methoden charakterisiert werden:

- Verwendung von Formfaktoren, wobei die genaue Form des Partikels unberücksichtigt bleibt
- Verbale Beschreibung zur qualitativen Bestimmung der Formgestalt
- Nutzung mathematischer Formfunktionen zur quantitativen Beschreibung der genauen Partikelform

Zur verbalen Beschreibung sind unterschiedliche Adjektivierungen eingeführt worden, wie nadelig, knollig, plattig, faserig u.v.w.m.²¹⁹ Diese einfache Umschreibung lässt eine grundlegende Klassifizierung von Partikeln zu, sofern sich die Form mit weiteren Eigenschaften wie Material, Herkunft oder mechanisches Verhalten korrelieren lässt. Die Verwendung von Formfaktoren besitzt eine große Praxisrelevanz, da sich hierüber durch einfache Analyseverfahren und Messungen grundlegende Eigenschaften der Partikel beschreiben lassen. Die geometrischen Formfaktoren beschreiben Größt- oder Hauptabmessungen, definierte Umfänge und Flächen oder auch statistische Längen. Neben diesen geometrischen Formfaktoren spielen aber auch die dynamischen Gestaltparameter eine wichtige Rolle. Sie können die Eigenschaften der jeweiligen Partikel beschreiben, wie sie sich in Strömungen oder ruhenden Fluiden verhalten. Sie werden meist in Form von Äquivalenten einfacher Körpergeometrien dargestellt.

²¹⁸ Eigene Darstellung. Vgl. Zlatev, S. 3.

²¹⁹ S. Merkus 2009, 28ff.

Die exakteste Methode zur Ermittlung der Partikelform ist die Nutzung von mathematischen Winkelfunktionen. Dabei können drei Messprinzipien unterschieden werden:

- Radius-Winkel-Messung,
- Sehnen-Winkel-Messung,
- Tangenten-Winkel-Messung.

Bei der Radius-Winkel-Messung werden ausgehend vom Partikelflächenmittelpunkt in definierten Winkelschritten die Radien zur Außenkante vermessen. Durch die gegebene Periodizität kann eine Auswertung mittels Fourier-Analyse die Partikelform bestimmen.²²⁰ Bei der Sehnen-Winkel-Messung wird die Partikelprojektion durch Sehnen gleichen Abstands fraktionierte. Die Schnittpunkte mit der Außenkante des Partikels liefern einen Umfang der im Verhältnis zur Anzahl der Sehnen ansteigt. Die Verhältnisse aus Sehnen zu Umfang liefern eine fraktale Dimension, die auch dazu geeignet ist, auf die räumliche Struktur des Partikels zu schließen.²²¹ Die Tangenten-Winkel-Messung umfasst die Partikelprojektionsfläche mit Tangenten gleicher Länge. Die jeweiligen Winkel benachbarter Tangenten werden gemessen. Die Auswertung erfolgt wiederum mittels Fourier-Transformation.²²²

Der am häufigsten verwendete Formparameter bei der Bauteilreinigung und zur Bemaßung von Partikeln ist der maximale Feretdurchmesser $d_{Fe\ max}$. Er ist festgelegt als der größtmögliche senkrechte Abstand zwischen parallelen Tangenten einer Partikelprojektion. In Abb. 4-20 sind von zwei Partikeln die Bemaßungen ihrer maximalen Feretdurchmesser dargestellt.

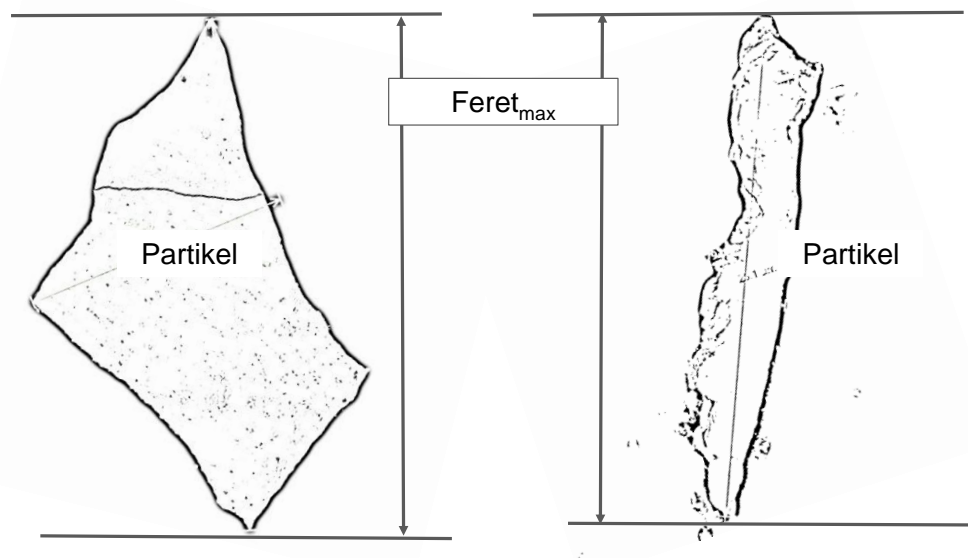


Abb. 4-20: Darstellung der maximalen Feretdurchmesser von unterschiedlichen Partikeln; die Aufnahmen weisen unterschiedliche Vergrößerungen auf²²³

²²⁰ S. SCHWARCZ und SHANE 1969.

²²¹ Vgl. Zlatev, S. 21; Kaye 1978; Richardson 1961 Fraktale wurden vom französischen Mathematiker Benoît Mandelbrot (1924-2010) eingeführt. Die durch seine Arbeiten gefundenen Klassen von geometrischen Mengen tragen seinen Namen.

²²² Vgl. Fong et al. 1979.

²²³ Eigene Darstellung.

Als Schädigungspotenzials von Partikeln, s. Abschnitt 4.1.1, entspricht der maximale Feret-durchmesser als „Worst-Case“-Szenario einem überbrückten elektrischen Kontaktabstand oder dem Verschluss eines Strömungskanal mit dieser Länge²²⁴.

Um die für die Adhäsionskraft benötigten Partikelformparameter rms_1 und λ_1 zu bestimmen, s. Gleichung (4-12), wird auf der großskaligen Rauheit eine Kombination aus geometrischen Formparametern und mathematischen Funktionen der Tangenten-Winkel-Messung verwendet. Ursprünglich zur Abschätzung der Transportwege bzw. Transportzeiten von Sedimentpartikeln entwickelt, ist die Rundheit ein zielführender geometrischer Formfaktor.²²⁵ Dabei wird die Projektionsfläche eines Partikels mit Kreisradien an allen konvexen Konturen nachgezeichnet. Die Summe aus den Verhältnissen von Kreisradien zum größten Innenkreisradius des Partikels, normiert auf die Anzahl aller Konturkreise, wird als Rundheit des Partikels bezeichnet und kann formal beschrieben werden mit²²⁶

$$p = \frac{1}{N} \sum_i^N \left(\frac{r_i}{R} \right) \quad (4-21)$$

mit

N : Anzahl konvexer Konturen
 r_i : Konturkreisradien
 R : Radius des größtmöglichen Innenkreises

Die konvexen Konturen stellen auch immer die großskaligen Auflageflächen dar, die für die Berechnung der Haftkräfte maßgeblich sind. Für ein Partikel sind die konvexen Konturkreise und der Innenkreis in Abb. 4-21 dargestellt.

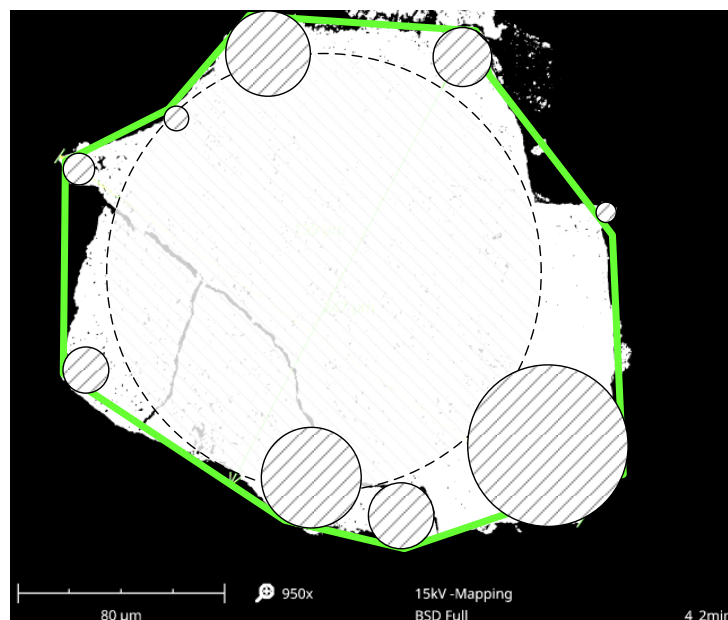


Abb. 4-21: Konturkreis und Innenkreise; grün markiert die Hüllkurve aus Tangenten an den Konturkreisen²²⁷

²²⁴ S. VDA-Richtlinie 19.1, S. 155.

²²⁵ Vgl. Wadell 1935, S. 250.

²²⁶ S. Zlatev, S. 13.

²²⁷ Eigene Aufnahme und Darstellung. Die Aufnahme des Partikels wurde mit einem Rasterelektronenmikroskop Phenom ProX erzeugt.

Aus den gemittelten Tangentenlängen und den Kreisradien lassen sich die mittleren Rauheiten ableiten und berechnen.

Die dafür notwendigen Bilder werden für große Partikel mittels lichtoptischer Messgeräte gewonnen. Für die Auswertung müssen über eine Bildbearbeitung die Werte für Kontrast und Helligkeit sehr hoch eingestellt werden. Sollte das Auflösungsvermögen von Lichtmikroskopen nicht ausreichen, kann ein Rasterelektronenmikroskop die nötige Vergrößerung liefern.

Die äußere Gestaltform von Körper hat sowohl für die Bindungsenergie als auch für die Lösungsmechanismen durch Fluidkräfte eine große Bedeutung. Die bisher angestellten Untersuchungen und deren funktionelle Ableitungen beschreiben kugelige Partikel mit einer rauen Oberfläche. Die sphärische Gestalt trifft jedoch nur für einen kleinen Anteil der Partikel zu. Die Abweichung von einer Kugelform kann durch die Sphärizität ausgedrückt werden. Die kann berechnet werden über die Gleichung (4-22)²²⁸.

$$\Psi_{sp} = \frac{X_{p,s}}{X_{a,z}} \quad (4-22)$$

mit

$X_{p,s}$: Durchmesser des projektionsflächengleichen Kreises bei stabiler Teilchenlage

$X_{a,z}$: Durchmesser eines Kreises, der die Teilchenprojektion umschließt

Die Messgrößen der Durchmesser des projektionsflächengleichen Kreises $X_{p,s}$ und des Durchmesser $X_{a,z}$, der die Teilchenprojektion umschließt, sind über die gleichen Messmethoden zu ermitteln, wie sie in Abschnitt 4.3.3 zur Restschmutzanalyse erläutert wurden. Der Durchmesser $X_{a,z}$ entspricht, dem Feret_{max}-Durchmesser zur Beschreibung des größten partikulären Schädigungspotenzials.

Die Sphärizität ist weiterhin entscheidend für die am Partikel wirkenden Fluidkräfte. Die funktionale Abhängigkeit kann über die Berechnung des partikulären Widerstandsbeiwerts c_w erfolgen. Eine detaillierte Auseinandersetzung erfolgt in Abschnitt 5.1.2

4.4.2 Geometrische Oberflächenanalyse

Um die kleinskaligen Mikrorauheiten zu bestimmen, muss die Oberfläche der Partikel analysiert werden. Das Vorgehen ist dabei ähnlich zu dem der großskaligen Struktur. Um die Oberfläche zu parametrieren, muss eine Seitenkante des Partikels derart fokussiert und vergrößert werden, dass die Mikroasperiten erkennbar sind. Eine Beispielaufnahme mit drei Vergrößerungsstufen ist in Abb. 4-22 gegeben.

Anschließend können wieder alle konvexen Konturen mit entsprechend großen Kreisradien identifiziert werden. Der Mittelwert der Abstände der Kreisradien zueinander ergibt dann die gesuchten λ_2 aus Gleichung (4-12). Mit den Radien der Asperiten wird der Vorgang wiederholt. Die Vermessung erfolgt auf der grafischen 2D-Projektion des Partikels. Dabei wird angenommen, dass die Asperiten rotationssymmetrische Halbkreise darstellen.

²²⁸ S. Zlatev, 11f.

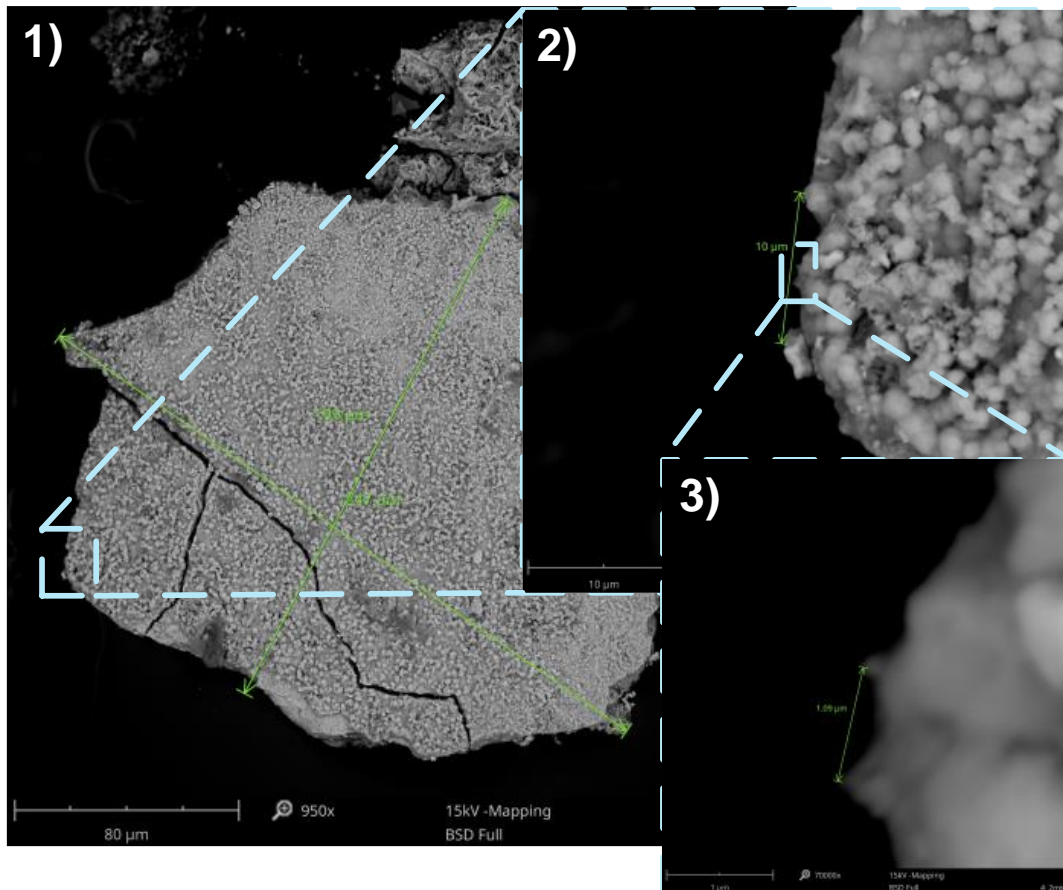


Abb. 4-22: Nahaufnahme der Oberflächenstruktur durch mehrstufiges Hineinzoomen ausgerichtet auf die Seitenkanten der Partikel²²⁹

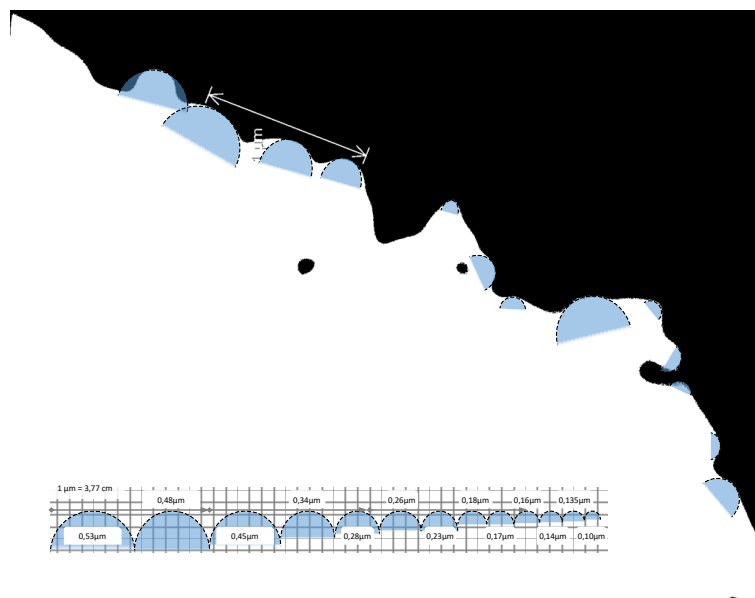


Abb. 4-23: Neu eingefärbte Rasterelektronenmikroskopieaufnahme mit erhöhtem Schwarz/Weiß-Kontrast; die Halbkreise stellen die doppelten Radien der Asperiten dar²³⁰

Die Untersuchung und Auswertung von partikulären Verunreinigungen und deren Oberflächenanalyse findet sich im Anhang D.5.

²²⁹ Eigene Aufnahme.

²³⁰ Eigene Aufnahme.

4.4.3 Statistische Auswertung der Partikeleigenschaften

Eine genauere Wiedergabe der realen Geometrie und der wirksamen Adhäsionsflächen stellt die Darstellung über Dichtefunktionen der Wahrscheinlichkeiten dar, in der Asperitenradien und -höhen in einem gewissen Intervall zu finden sind²³¹. Dabei ist die Dichte- und Verteilungsfunktion der Radien r_2 gegeben durch Gleichung (4-23).

$$\phi(r_2)_{NV} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\mu-r_2)^2}{\sigma^2}\right), \quad (4-23)$$

$$\Phi(r_2)_{NV} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} \exp\left(-\frac{(\mu-r_2)^2}{\sigma^2}\right) dr_2$$

mit

$\phi(\xi)_{NV}$: Dichtefunktion der Asperitenradien

$\Phi(r_2)_{NV}$: Verteilungsfunktion der Asperitenradien

σ : Standardabweichung der Asperitenradien und -höhen

μ : Erwartungswert der Asperitenradien und -höhen

Die die Verteilungsfunktion beschreibenden Parameter können aus den Ausschnittgraphiken der größten Auflösungsbilder der Partikel gewonnen werden.

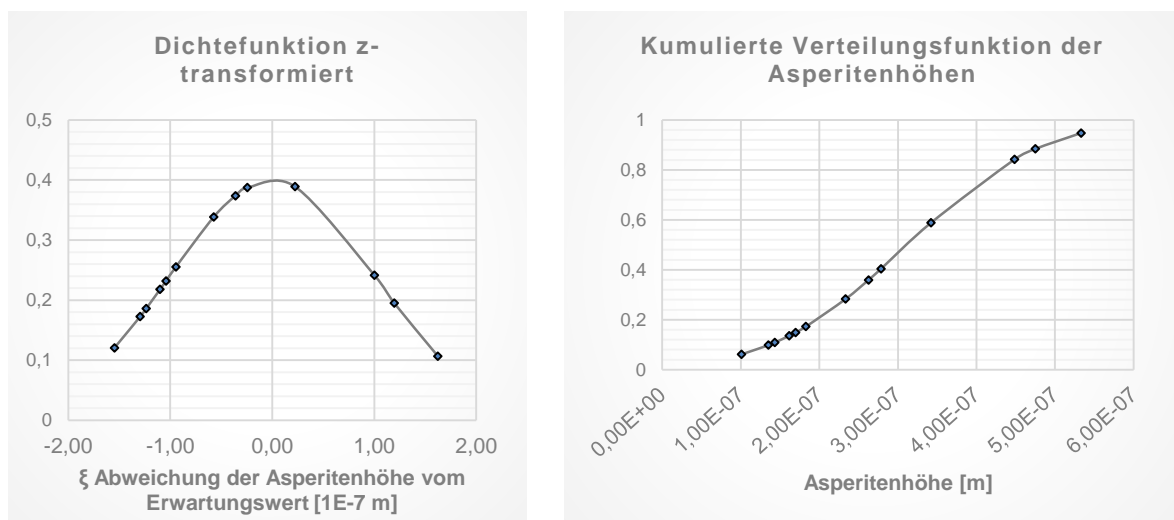


Abb. 4-24: Dichtefunktion (z-transformiert) und Verteilungsfunktion der Asperitenradien aus Abb. 4-23

Grundlage für die dargestellte Verteilungsfunktion ist die Berechnung des Erwartungswertes $\mu = 0,312 \mu\text{m}$ und der Standardabweichung $\sigma = 0,136 \mu\text{m}$ der in Abb. 4-23 dargestellten Partikel und der zugehörigen Vermessung. Die Größenordnungen der gemessenen und berechneten Werte stimmen sehr gut mit denen aus der Literatur überein²³².

²³¹ Prokopovich und Perni 2011.

²³² Vgl. Prokopovich und Perni 2010, S. 17033.

4.5 Bindungsenergie von Verunreinigungen auf zerspannten Stahlbauteilen

Die bisherigen theoretischen Abhandlungen sollen nun anhand einer Beispielrechnung praxistauglich illustriert werden. Dazu ist ein Bauteil einer realen Produktion analysiert worden. Das Bauteil wird als Grünling geliefert. Es erfolgen mehrere Zerspanoperationen wie Drehen, Bohren und Fräsen. Diese werden auf einer Werkzeugmaschine durchgeführt. Somit findet nur eine Art von Kühlschmierstoff Verwendung. Die Reinigung ist notwendig, da das Bauteil nach der geometrischen Bearbeitung einem Wärmebehandlungsverfahren unterzogen wird, bei dem eine filmfreie Oberfläche notwendig ist. Die partikulären Verunreinigungen sollen ebenfalls entfernt werden. Das Bauteil wird für eine Hydraulikpumpe verwendet, so dass entsprechende Sauberkeitsspezifikationen definiert wurden.

Um die Bindungsenergien und damit die Grundlage des EPM, s. (3-2) zu berechnen, müssen alle Energietherme E_{mi} der Input- und Outputmaterialien ermittelt werden. Die ersten Analyseschritte umfassen somit, sowohl vor als auch nach der Reinigung eine Restschmutzanalyse, s. Abschnitt 4.3.3.

Für das Beispielbauteil wurden folgende Resultate aus der Partikelextraktion und -zählung erzielt, s. Abb. 4-25.

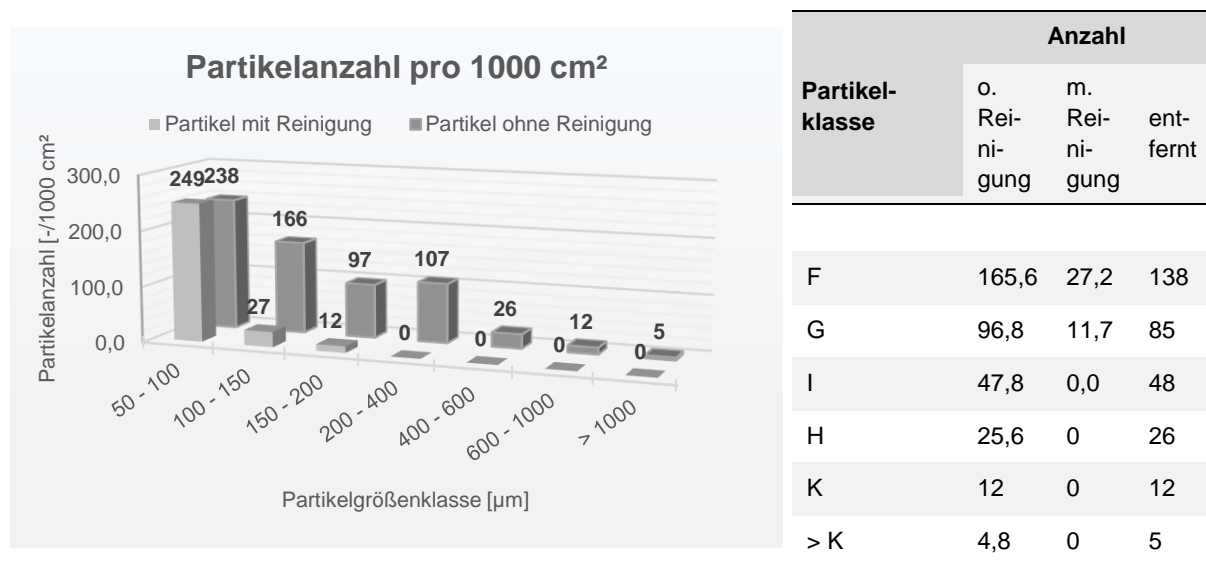


Abb. 4-25: Partikelzählung für ein Bauteil vor und nach der Reinigung²³³

Obwohl bei der Partikelanalyse mit detektiert, gibt es für die Anzahl von Partikeln der Klasse F keinen Reinigungseffekt. Das Bauteil ist dennoch mit „i.O.“ klassifiziert worden. Daraus folgt, dass die Anlage nur Partikel ab Partikelgrößenklasse G entfernen kann und soll. Bei den Partikeln werden nur metallischen Partikel berücksichtigt.

Es handelt sich um einen Stahlwerkstoff und zur Berechnung und Analyse kann mit geringem Fehlereinfluss davon ausgegangen werden, dass die Partikel von demselben Werkstück stammen, auf dem sie detektiert wurden. Somit liegen für die Berechnung die gleichen Materialeigenschaften und -parameter vor.

²³³ Eigene Darstellung.

Die Haftkräfte der Partikel lassen sich nach (4-12) berechnen. Benötigte Parameter der Berechnung sind Tab. 4-3 zu entnehmen.

Tab. 4-3: Materialparameter und gemessene geometrische Größen der Partikel

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Freier Oberflächenenergie	$\Delta\gamma$	0,092	[J/m ²]	Messung
Asperitenradius	r_1	1,50	($\cdot 10^{-5}$) [m]	Messung
Asperitenradius	r_2	3,12	($\cdot 10^{-7}$) [m]	Messung
Hamaker-Konstante	A_H	2,88	($\cdot 10^{-19}$) [J]	²³⁴
Grobrauheit	rms_1	7,34	($\cdot 10^{-6}$) [m]	Messung
Feinrauheit	rms_2	4,52	($\cdot 10^{-9}$) [m]	Messung
Asperitenabstand	λ_1	8,00	($\cdot 10^{-5}$) [m]	Messung
Asperitenabstand	λ_2	3,7	($\cdot 10^{-7}$) [m]	Messung

Welches Adhäsionsmodell (JKR vs. DMT) und dessen Anteil an der Bindungskraft verwendet werden muss, kann über den Tabor-Faktor ermittelt werden, s. Gleichung (4-11). Im Falle einer Materialpaarung von Stahl-Stahl, wie sie für das Beispielbauteil zutreffend ist, ergibt sich der Tabor-Parameter, wie er Tab. 4-4 zu entnehmen ist.

Tab. 4-4: Berechnung des Tabor-Parameters

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Elastizitätsmodul	E	2,1	($\cdot 10^{-12}$) [N/m ²]	Stahl
Poisson-Zahl	ν	0,3	[-]	Stahl
Tabor-Parameter	μ_T	6,15	($\cdot 10^{-13}$)	

Damit ist das DMT-Modell relevanter, da durch die hohen Materialsteifigkeiten sehr geringe Verformungen zu erwarten sind.

Die Werkstoffeigenschaften und die Verunreinigungsmenge ergeben folgende Bindungskräfte. In Tab. 4-5 sind die Bindungskräfte bereits normiert auf eine Fläche von 1000 cm².

Tab. 4-5: Berechnung der Adhäsionskräfte für ein Einzelpartikel und summiert pro Partikelgrößenklasse

Partikelgrößenklasse	Anzahl Entfernung	$F_{ad Rab Einzel}$ [$\cdot 10^{-9} N$]	$F_{ad Rab ges}$ [$\cdot 10^{-6} N$]
F	138	467,26	64,65
G	85	467,72	39,82
I	48	468,20	22,47
H	26	468,47	11,99
K	12	468,62	5,62

²³⁴ Song et al. 2015, S. 40.

Partikel- größenklasse	Anzahl Entfernung	$F_{ad\ Rab\ Einzel}$ [$\cdot 10^{-9} N$]	$F_{ad\ Rab\ ges}$ [$\cdot 10^{-6} N$]
> K	5	468,71	2,25

Auffällig ist die Unabhängigkeit der Einzelbindungskräfte von ihrer Größe. Dies wird verständlicher, wenn die Veränderung der Bindungskräfte in Abhängigkeit der Feinrauheit rms_2 verdeutlicht wird, s. Abb. 4-26. Je größer die Feinrauheit und damit die Asperitenradien, desto kleiner ist die Abhängigkeit der Haftkraft von der Partikelgröße. Ab etwa 0,5 nm rms_2 haben die verschiedenen Partikelgrößen keine wesentlich verschiedenen Haftkräfte.

Um die Bindungsenergie zu berechnen, muss die Wegstrecke definiert werden, über die die Bindungskräfte überwunden werden sollen. Hier können unterschiedliche Ansätze gewählt werden, wie der Wirkradius der Van-der-Waals-Kräfte oder durch das gleichzeitige Auftreten von filmischen Verunreinigungen deren Filmdicke. Es müssen auch Kapillarkräfte überwunden werden, deren Wirklänge deutlich größer ist.²³⁵

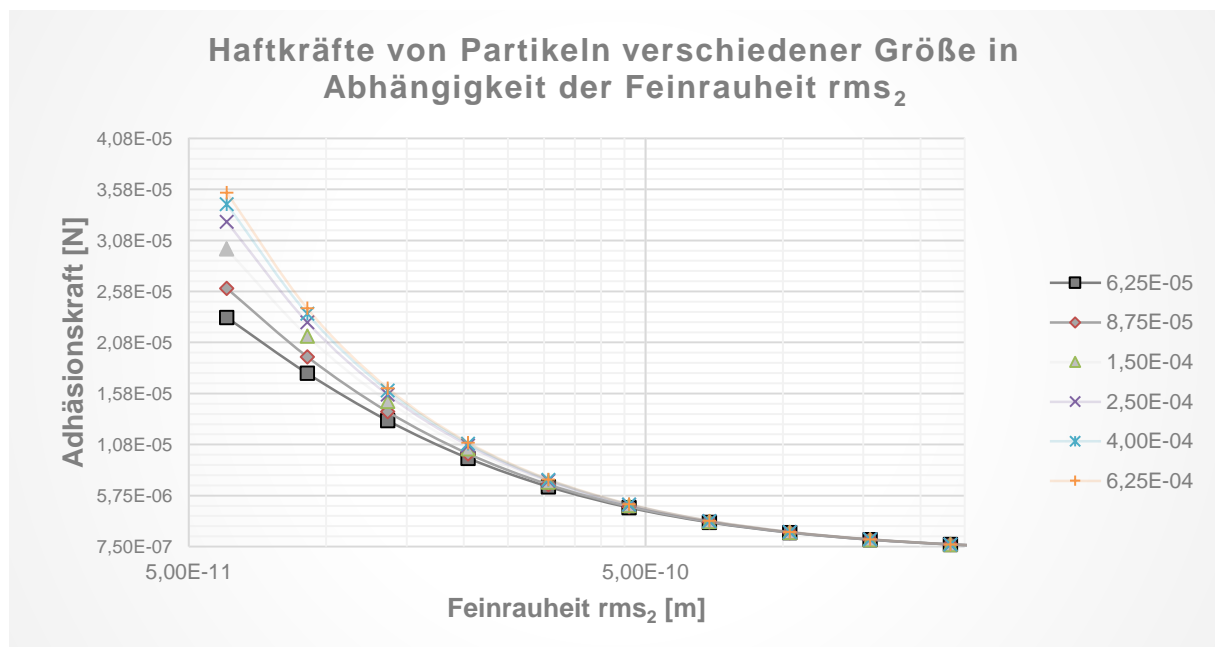


Abb. 4-26: Haftkräfte Partikel verschiedener Durchmesser über die Feinrauheit rms_2 ²³⁶

Um die vollständigen Energietherme für das EPM zu ermitteln, müssen die Bindungskräfte der filmischen Verunreinigungen sowie die verstärkten Haftkräfte auf die Partikel durch sich ausbildende Kapillare der Fluidverunreinigungen berechnet werden. Dazu ist dessen Extraktion und Analyse notwendig, wie sie in den Abschnitten 4.3.3 und 4.3.4 gezeigt wurden.

Für das Beispielbauteil ergaben sich folgende Ergebnisse der Restschmutzanalyse, s. Tab. 4-6.

²³⁵ Dabei soll von einer konstanten Bindungskraft ausgegangen werden. Dies überschätzt die realen Bindungsenergien der Partikel zwar, ist für die weitere Berechnung durch die größeren Kapillarkräfte aber nachrangig.

²³⁶ Eigene Darstellung.

Tab. 4-6: Ergebnisse der Restschmutzanalyse; beim Schmierstoff bei der Zerspanung handelt es sich um emulgierte KSS auf Mineralölbasis

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Restschmutzmenge	m_L	3,5	($\cdot 10^{-3}$) [kg]	Pro Bauteil
Oberfläche Bauteil	A_P	2,57	($\cdot 10^{-2}$) [m ²]	Aus technischer Zeichnung
Dichte Mineralöl	ρ_L	0,8	($\cdot 10^3$) [kg/m ³]	Aus Datenblatt
Höhe der Filmschicht	h_L	175	($\cdot 10^{-6}$) [m]	Annahme der gleichmäßigen Verteilung auf Oberfläche
Oberflächenspannung	γ_L	44	($\cdot 10^{-3}$) [N/m]	Messung; dynamisch
Kontaktwinkel	θ_L	29,7	[°]	²³⁷

Aus den ermittelten Werten kann die Adhäsionsarbeit, nach Gleichung (4-15), berechnet werden. Für die filmischen Verunreinigungen auf einem Bauteil ergibt sich daraus die Bindungsenergie.

Tab. 4-7: Adhäsionsarbeit und Bindungsenergie der filmischen Verunreinigung

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Adhäsionsarbeit	W_A	0,082	[J/m ²]	
Bindungsenergie	E_{ML}	2,11	($\cdot 10^{-3}$) [J]	Bezogen auf ein Bauteil

Die Kapillarkräfte werden durch die genannte mathematische Beziehung (4-17) berechnet. Die Kapillarkräfte können zu den Bindungskräften der Partikel hinzugerechnet werden und ergeben damit die totalen adhäsiven Bindungen $F_{ad\ tot}$.

Tab. 4-8: Berechnung der Bindungskräfte der Partikel

Partikel- größenklasse	Anzahl Entfernung	$F_{ad\ Rab\ part}$ [$\cdot 10^{-9}$ N]	$F_{ad\ Rab\ sum}$ [$\cdot 10^{-6}$ N]	$F_{ad\ Cap\ part}$ [$\cdot 10^{-6}$ N]	$F_{ad\ Cap\ sum}$ [$\cdot 10^{-6}$ N]	$F_{ad\ tot}$ [$\cdot 10^{-6}$ N]
F	138	467,26	64,65	30,02	4153,34	4217,99
G	85	467,72	39,82	42,02	3577,44	3617,26
I	48	468,20	22,47	72,04	3458,04	3480,52
H	26	468,47	11,99	120,07	3073,82	3085,81
K	12	468,62	5,62	192,11	2305,36	2310,99
> K	5	468,71	2,25	300,18	1440,85	1443,10

Durch sinkende Häufigkeit größerer Partikel sinkt deren Anteil an der totalen Bindungskraft. Während die kleinste zu entfernende Partikelklasse F noch 23 % der Bindungskräfte ausmacht, sind es bei den Partikeln größer Klasse K – also größer als 1 mm im Durchmesser – 8 %. In Abb. 4-27 sind die summierten Bindungskräfte der Partikelgrößenklassen und auch die Summenkurve der einzelnen Anteile zur Gesamtbindungskraft dargestellt.

²³⁷ S. Schuler 2014, S. 83.

Werden die adhäsiven Anteile einer einzelnen Partikelgrößenklasse analysiert, so fällt auf, dass die Kapillarkräfte gegenüber den Kontaktkräften der Partikel etwa um den Faktor 10^3 größer sind. Die Volumina der fluiden Menisken des Mineralöls wachsen proportional zum Partikeldurchmesser. Dadurch nimmt der Anteil der Kapillarkräfte an den totalen Bindungskräften mit größeren Partikeldurchmessern stetig zu.

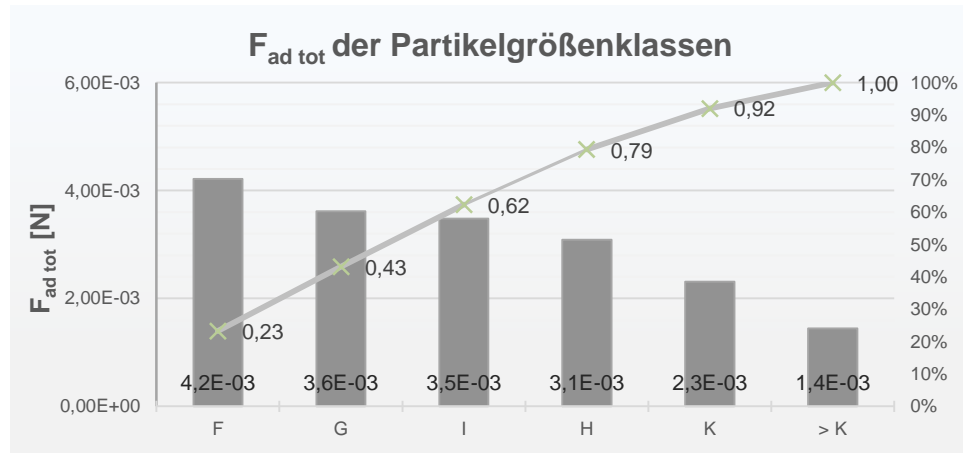


Abb. 4-27: Adhäsive Gesamtkräfte und die Summenkurve der einzelnen Partikelklassen

Die ermittelte Filmdicke ist bei gleichmäßiger Verteilung etwa 175 μm stark. Diese Höhe wird als Weglänge der Kraftwirkung definiert, damit alle Bindungskräfte überwunden werden. Damit kann die Bindungsenergie der Partikel und auch die Gesamtbindungsenergie der Verunreinigung berechnet werden.

Tab. 4-9: Berechnung des EPM für das Beispielbauteil

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Summe der adhäsiven Kräfte	$F_{ad\ ges}$	18,15	($\cdot 10^{-3}$) [N]	
Energie zur Überwindung der $F_{ad\ ges}$	E_{MP}	0,00317	($\cdot 10^{-3}$) [J]	Bezogen auf ein Bauteil; Weglänge zum Überwinden der Bindungskräfte $h_L=175\ \mu\text{m}$
Bindungsenergie	E_{ML}	2,113	($\cdot 10^{-3}$) [J]	Bezogen auf ein Bauteil
Gesamtbindungsenergie \Rightarrow Energetisch-Physikalisches Minimum	EPM	2,116	($\cdot 10^{-3}$) [J]	

Durch die Untersuchungen und Berechnungen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden. Bei Vorliegen von filmischen und partikulären Verunreinigungen übersteigen die Kapillarkräfte die der adhäsiven Kontaktkräfte der Partikel um den Faktor 10^3 . Mit zunehmender Partikelgröße wächst die Stärke der Kapillarkräfte linear. Die Kontaktkräfte sind stark von ihrer Oberflächenstruktur und Rauheiten abhängig. Auch mit wachsendem Durchmesser wird die Kontaktfläche nur noch unwesentlich erhöht.

Das EPM für die Bauteilreinigung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen:

- Die Energietransformation zur Überwindung der partikuläre Kontaktkräfte E_{MP} und
- die Transformation durch die fluiden Verunreinigungen und deren Adhäsionsarbeitsvermögen E_{ML}

Formal kann das EPM damit als Funktion mit folgenden Variablen definiert werden, Gleichung (4-24).

$$EPM = E_{MP} + E_{ML} = f(X_P, X_L) \quad (4-24)$$

mit

X_L : Eigenschaftsvariable der fluiden Verunreinigungen; $X_L = f(m_L, \Delta\gamma, \theta_{LG})$

X_P : Eigenschaftsvariable der partikulären Verunreinigungen;
 $X_P = f(X_L, X_{PS}, X_{PM}, \Delta CCC)$

X_{PS} : Gestaltvariable der Partikel; $X_{PS} = f(rms_i; R)$

X_{PM} : Materialparameter der Partikel; $X_{PM} = f(\rho, A_H; E^*, \nu)$

ΔCCC : Änderung der Partikelkonzentration; $\Delta CCC \approx 2^{m-n}$

m : Partikelkonzentrationsklasse vor Reinigung

n : Partikelkonzentrationsklasse nach Reinigung

Das EPM kann als Basisdefinition des Nutzens der Energieeffizienzbewertung herangezogen werden. Dabei lassen sich alle weiteren auch in der Praxis üblichen energetischen Nutzengrößen als Skalare vom EPM ableiten. Aus der Anzahl von Bauteilen kann die Menge und Art der Verunreinigungen analysiert werden und somit direkt das energetisch-physikalische Minimum zur Transformation von verschmutzten zu technisch sauberen Bauteilen ermittelt werden.

5 Lösungsmechanismen zum Entfernen von Verunreinigungen und Bereitstellung der benötigten Energieform

Die Energiebedarfsanalyse ist im Falle einer Effizienzbewertung als deren Aufwand zu betrachten. In diesem Kapitel werden die Energiebedarfe bilanziert, die der Technologie Spritzreinigung als Minimalwert gelten, um die Bindungskräfte zwischen Verunreinigung und Bauteil zu lösen. Das Kapitel ist so strukturiert, dass die Schalen von innen nach außen betrachtet werden und somit dem Konzept einer Bottom-Up-Methode folgen. Der Ablauf zur Berechnung ist in Abb. 5-1 dargestellt.

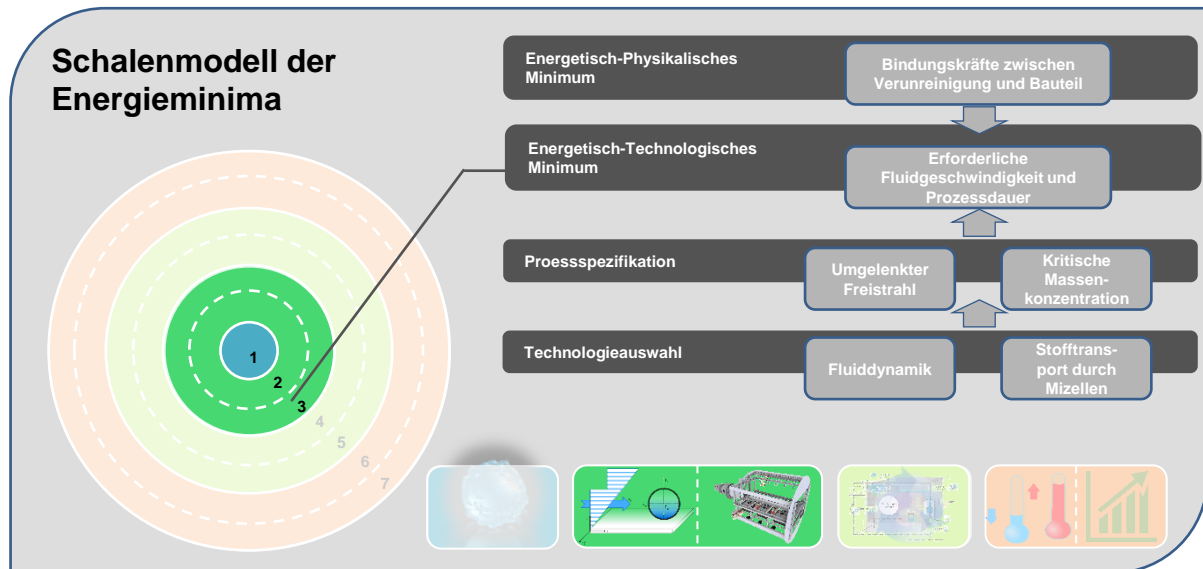


Abb. 5-1: Vorgehen zur Berechnung des energetisch-technologischen Minimums für die Bauteilreinigung²³⁸

Nach dem MVC-Schalenmodell sind nach der inneren Schale (physikalisches Minimum, berechnet über die direkten Bindungsenergien der Verunreinigungen auf der Bauteiloberfläche) die aufwandseitigen äußeren Schalen zu ermitteln. Das technologische Minimum umfasst die Beschreibung der Lösungsmechanismen, um anhand derer die Energiedissipationen aufzuzeigen. Das technische Minimum steht für die Technologieauswahl und beschränkt sich im vorliegenden Fall auf die wässrige Spritzreinigung. Dadurch wird die mechanische Energie über eine kinematische Energiekomponente übertragen. Als Energieträger dient ein bewegtes Fluid. Des Weiteren werden thermische und chemische Energien zum Lösen der Bindungsenergien aufgewandt, die die filmischen Verunreinigungen betreffen.

Somit erfolgt in diesem Kapitel die erste Festlegung des Bewertungsraumes. Dies umfasst die Bilanzgrenze (Raum und Zeit), Aggregation und Einheit. Die Bilanzgrenze bilden die Energieflüsse direkt auf der Bauteiloberfläche. Die Aggregation erfolgt zum Ende der Analyse, wenn die Lösungsmechanismen durch kinetische und chemische Energie zusammengeführt werden.

²³⁸ Eigene Darstellung.

5.1 Lösungsmechanismen durch kinetische Energie von Fluidströmungen

Im ETM wird die gewählte Technologie für den Transformationsprozess analysiert. Die am häufigsten gewählte Technologie zum Entfernen von Verunreinigungen sind Nassverfahren. Sie bieten den immanenten Vorteil, dass sich Kombinationen aus partikulären und filmischen Verunreinigungen gleichermaßen entfernen lassen. Kapitel 4 hat die Basis der Energieeffizienzbewertung aufgezeigt. An dieser Stelle sollen nun die Lösungsstrategien zum Überwinden der herrschenden Haftkräfte zwischen Verunreinigung und Bauteil beschrieben, analysiert und berechnet werden.

Zunächst wird der Fall betrachtet, dass eine rein partikuläre Verunreinigung vorliegt. Wie der Lösungsmechanismus bei einer Kombination von Verunreinigungen funktioniert, wird in Unterkapitel 5.4 zusammenfassend erläutert.

Wie bei der Verfahrensauswahl in Abschnitt 2.1.1 gezeigt, ist der Energieträger ein bewegtes Reinigungsfluid. Die Bewegung ist Ausdruck für die kinetische Energie, die dem Fluid innewohnt. Diese kinetische Energie soll auf das Partikel übertragen werden, damit die Haftkräfte überwunden werden.

Zur Bestimmung der benötigten kinetischen Energie des Fluidstroms sollen zunächst die Kräfte eingeführt und beschrieben werden, die auf ein umströmtes Partikel einwirken. Sie lassen sich nach drei Wirkmechanismen gruppieren: Wechselwirkungen durch Kontakt, wirkende Kraftfelder und hydrodynamische Kräfte. Die Gruppe der Kontaktwechselwirkungen wurde besprochen und berechnet, s. Kapitel 4. Kraftfelder beschreiben mögliche Einflüsse auf das Partikel die nicht über das Fluid selbst wirken. Dazu zählen Magnetfelder, elektrostatische Felder und das Gravitationsfeld. Nur die gravitativen Eigenschaften des massebehafteten Partikels müssen berücksichtigt werden. Elektromagnetische Wechselwirkungen können im praktischen Umfeld einer Fertigung gezielt genutzt oder ausgeschlossen werden. Die wichtigsten Kräfte zum Lösen der Verbindungsenergie sind hydrodynamische Kräfte. Durch die komplexen Vorgänge von strömungstechnischen Systemen und ihrer enthaltenen Dynamik werden die verschiedenen Einzelphänomene durch eigene Kräfte definiert.

5.1.1 Hydrodynamische Kräfte und Momente auf Partikel in einer Strömung

Als Basis der Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte dienen die drei Grundprinzipien, mit denen die Bewegung eines Teilchens in einem strömenden Fluid beschrieben werden kann: Masseerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung. Sie führen zu der bekannten Navier²³⁹-Stokes²⁴⁰-Gleichung²⁴¹ (5-1). Sie sind eine mathematische Beschreibung der durch alle wirkenden Kräfte verursachten Bewegung realer Fluide. Reale Fluide bezeichnen dabei den Einfluss der Viskosität und damit die im Fluid erzeugten Scherspannungen proportional zur Verformungsgeschwindigkeit.²⁴²

²³⁹ Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) war ein französischer Mathematiker und Physiker.

²⁴⁰ George Gabriel Stokes (1819-1903) war ein irischer Mathematiker und Physiker.

²⁴¹ Vgl. Sigloch 2017, S. 262 Sie ist hier in der vereinfachten Form für inkompressible Medien dargestellt, da der in dieser Arbeit behandelte Fall dies zulässt. Ebenso brauchen die Energietерme nicht berücksichtigt werden.

²⁴² Die Navier-Stokes-Gleichungen beschreiben Strömungsbewegungen in ausführlicher Form als gekoppeltes System von vier partiellen Differentialgleichungen zweiter Ordnung und zweiten Grades. Sie sind damit bisher nicht analytisch

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{f} - \vec{\nabla}p + \eta \Delta \vec{v} \quad (5-1)$$

mit

ρ : Fluiddichte

\vec{v} : Geschwindigkeitsvektorfeld; $\frac{D\vec{v}}{Dt} = \frac{d}{dt} \{v_x \ v_y \ v_z\}$

\vec{f} : Spezifische Volumenkraft; bei reiner Wirkung im Gravitationsfeld gilt $\vec{f} = \{f_x \ f_y \ f_z\} = \{0 \ 0 \ -\rho g\}$

$\vec{\nabla}p$: Druckgradient; $\vec{\nabla}p = \frac{\partial p}{\partial i}; i = x, y, z$

η : Dynamische Viskosität

$\eta \Delta \vec{v}$: Reibungskraftkomponenten; $\eta \Delta \vec{v} = \eta \left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial z^2} \right); i = x, y, z$

Um die schwierigen Gleichungen zu lösen, wird die Problematik durch Vereinfachungen abstrahiert. Dabei kann der Mechanismus zum Überwinden der Bindungsenergien im vorliegenden Fall in einer ebenen, stationären Strömung eines inkompressiblen Fluids angesehen werden. Damit vereinfacht sich Gleichung (5-1) zu einem zu lösenden Kräftegleichgewicht, s. (5-2).

$$0 = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \partial p / \partial x \\ \partial p / \partial y \\ \partial p / \partial z \end{pmatrix} + \eta \begin{pmatrix} \partial^2 v_x / \partial x^2 & \partial^2 v_y / \partial x^2 & \partial^2 v_z / \partial x^2 \\ \partial^2 v_x / \partial y^2 & \partial^2 v_y / \partial y^2 & \partial^2 v_z / \partial y^2 \\ \partial^2 v_x / \partial z^2 & \partial^2 v_y / \partial z^2 & \partial^2 v_z / \partial z^2 \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

Mit dem d'Alembertschen Prinzip²⁴³ und der Newtonschen²⁴⁴ Impulsbilanz lassen sich die Kräfteverhältnisse auf ein sich im Fluidstrom befindliches Partikel beschreiben, s. Gleichung (5-11).²⁴⁵ Anschaulich zeigt Abb. 5-2 die Kräfte und ihre Wirkrichtung.

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \sum_i \vec{F}_i \quad (5-3)$$

mit

m_p : Partikelmasse

\vec{v}_p : Partikelgeschwindigkeit

\vec{F}_i : Vektorielle Kräfte

Die hydrodynamischen Kräfte können in Oberflächen- und Massekräfte unterteilt werden. Sie werden im Folgenden genauer erklärt.

zu lösen und stellen eines der heutigen Mathematik-Millenniumprobleme dar. Sie sind Ausgang für fast alle numerischen strömungstechnischen Problemlösungen.

²⁴³ Jean-Baptiste le Rond d'Alembert (1717-1783) war ein französischer Mathematiker und Physiker. Das Prinzip besagt, dass die Vektorsumme aller Kräfte im Gleichgewicht gleich null ist.

²⁴⁴ Isaac Newton (1643-1727) war ein britischer Philosoph. Durch seine Arbeiten auf den Gebieten der Mathematik und Physik gilt er als einer der bedeutendsten Wissenschaftler überhaupt.

²⁴⁵ Vgl. Eppler et al. 2012, S. 122.

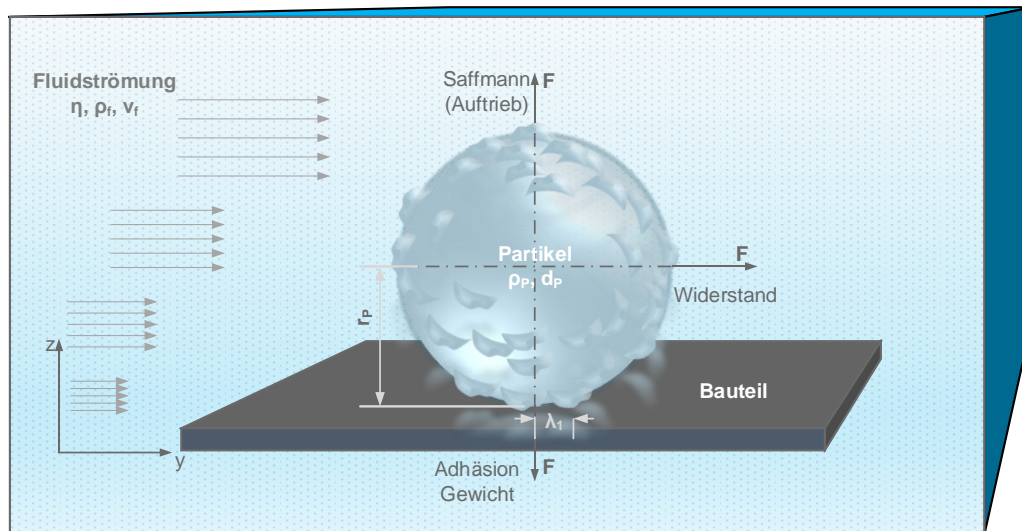


Abb. 5-2: Kräftegleichgewicht an einem Partikel im Fluidstrom; die dreidimensionale Darstellung dient der Anschauung – es reicht eine mathematische Beschreibung in der Ebene mit zwei Koordinatenrichtungen.²⁴⁶

Die Widerstandskraft F_w wird durch die Relativgeschwindigkeit von Partikel und Fluid verursacht. Neben der Proportionalität zur Geschwindigkeitsdifferenz hängt der hydrodynamische Widerstand auch von der Gestalt und der Oberflächenbeschaffenheit des Partikels ab. Diese Abhängigkeit wird im Widerstandsbeiwert c_w zusammengefasst. Formalisiert wird die Widerstandskraft durch Gleichung (5-4).²⁴⁷

$$|\vec{F}_W| = \frac{1}{8} \pi d_p^2 \rho_F c_w (\vec{v}_F)^2 \quad (5-4)$$

mit

m_p : Masse des Partikels

d_p : Partikeldurchmesser

$\rho_{F,p}$: Dichte von Partikel, Fluid

Die *Saffmann-Kraft* entsteht durch Geschwindigkeitsgradienten über den Partikeldurchmesser. Durch die Randbedingung, dass die tangentielle Geschwindigkeitskomponente der Fluidströmung in Wandnähe gegen null geht, ergibt sich über den Partikeldurchmesser eine Geschwindigkeitsverteilung. Dadurch entsteht eine Auftriebswirkung, die sich formal durch Gleichung (5-5) beschreiben lässt.²⁴⁸

$$|\vec{F}_{Saff}| = 1,615 \nu d_p^2 |\vec{v}_F| \left(\frac{\rho_F}{\nu} \frac{dv_F}{dz} \Big|_{z=d/2} \right)^{1/2} \quad (5-5)$$

mit

ν : Kinematische Viskosität²⁴⁹; $\nu = \eta / \rho_F$

d_p : Partikeldurchmesser

²⁴⁶ Eigene Darstellung. Vgl. Scheiff 2015, S. 64.

²⁴⁷ Vgl. Epple et al. 2012, S. 123.

²⁴⁸ Vgl. Saffman 1965. Notation nach Scheiff 2015, S. 62.

²⁴⁹ Um Verwechslungen zu vermeiden, sind alle Geschwindigkeitsvariablen mit einem Index v_i versehen.

Neben der Widerstandskraft und der Saffmann-Kraft existieren noch weitere Oberflächenkräfte. Dazu zählen die Basset-Kraft²⁵⁰, Magnus-Kraft²⁵¹ und die Druckkräfte²⁵². Sie können aufgrund der herrschenden Randbedingungen vernachlässigt werden. Die im Folgenden erläuterten Kräfte, zählen zu den Massekräften.

Die *Gewichtskraft* ist keine hydrodynamische Kraft, da sie unabhängig vom Fluid wirkt. Allerdings wirkt ihr die *Auftriebskraft* entgegen und kann über das Dichteverhältnis von Partikel und Fluid mit ihr verrechnet werden. Sie wird formal beschrieben durch die Gleichung (5-6).

$$F_G = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_P - \rho_F) g \quad (5-6)$$

mit

g : Schwerebeschleunigung

Darüber lässt sich das Kräfte- und Momentengleichgewicht bilden. Um das ruhende Partikel von seiner Ortsposition zu entfernen, müssen die hydrodynamischen Kräfte größer sein als die Adhäsions- und Gewichtskraft. Mit gegebenen Parametern für das Fluid und die Partikel ergibt sich daraus eine zu ermittelnde Mindestgeschwindigkeit.

Mit den Gleichungen (4-12), (5-5) und (5-6) in (5-3) erhält man folgende Gleichung (5-7) für die Summe der Kräfte.

$$|\vec{v}_{F \text{ Saff min}}| \geq \left(\frac{\frac{\pi}{3} d_p^3 (\rho_P - \rho_F) g + \frac{A_H R}{6 H_0^2} [x_{rms}]}{1,615 \mu d_p^2 \left(\frac{\rho_F}{\mu} \right)^{1/2}} \right)^{2/3} \quad (5-7)$$

mit

x_{rms} : Rauheitsvariable; $x_{rms} \stackrel{\text{def}}{=} \text{als Term in [] aus Gleichung (4-12)}$

\vec{v}_F : Unter der Annahme, dass $\left. \frac{dv_F}{dz} \right|_{z=d/2} = \frac{v_F}{2}$

Und mit dem in Abb. 5-2 bemaßten Momentenangriffspunkt λ_1 gilt folgende Mindestgeschwindigkeit (5-8) über die Widerstandskraft.

$$|\vec{v}_{F W \text{ min}}| \geq \left(\frac{\lambda_1 \left(\frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_P - \rho_F) g + \frac{A_H R}{6 H_0^2} [x_{rms}] \right)}{\frac{1}{16} \pi d_p^3 \rho_F C_W} \right)^{1/2} \quad (5-8)$$

mit

x_{rms} : Rauheitsvariable; $x_{rms} \stackrel{\text{def}}{=} \text{als Term in [] aus Gleichung (4-12)}$

²⁵⁰ Die Basset-Kraft wird hervorgerufen durch die instationäre Beschleunigung der Partikelgrenzschicht. Während eines Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsvorganges sind die Form und das Volumen der Grenzschicht einer ständigen Veränderung unterworfen. Die Basset-Kraft hängt somit von der zeitlichen Entwicklung der Relativbewegung ab. Die Basset-Kraft kann für große Dichteunterschiede zwischen Fluid- und Partikelphase vernachlässigt werden, s. Eppe et al. 2012, S. 125.

²⁵¹ Die Magnus-Kraft wirkt ähnlich der Saffman-Kraft, wird im Gegensatz dazu, durch eine Eigenrotation des Partikels verursacht, s. Scheiff 2015, S. 64.

²⁵² Die Druckkraft tritt bei einem im Fluid veränderlichen Druck um das Partikel auf. Da es sich in diesem Fall um eine offene Strömung handelt, kann sie vernachlässigt werden, s. Eppe et al. 2012, S. 126.

5.1.2 Einfluss des Strömungsregimes durch Berechnung von Partikel-Reynoldszahlen

Aus den Gleichungen (5-7) und (5-8) ist nach erfolgter Partikelanalyse nur eine Größe unbekannt: der Widerstandsbeiwert c_w . Sie fasst die Randbedingungen der Strömung und die Parameter des umströmten Körpers zusammen. Sie kann als Funktion (5-9) der dimensionslosen Reynolds-Zahl definiert werden.

$$c_w = f(Re_p) \quad (5-9)$$

Die Reynolds²⁵³-Zahl ist ein Ähnlichkeitsparameter zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse.²⁵⁴ Sie ist definiert durch Gleichung (5-10).

$$Re_p = \frac{v_F d_p \rho_F}{\eta} = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} \quad (5-10)$$

mit

p : Index p weist auf die Partikelströmung hin und lässt die Partikel-Reynolds-Zahl erkennen

Verallgemeinert ist die Reynolds-Zahl immer durch ein charakteristisches Längenmaß, die Fluidgeschwindigkeit und die inneren Reibungsfluideigenschaften definiert. Bezogen auf ein Partikel, beschreibt die Reynolds-Zahl das Verhältnis von massebezogenen zu reibungsbezogenen Kräften²⁵⁵. Der funktionale Kurvenverlauf der Gleichung (5-9) ist in Abb. 5-3 dargestellt. Es lassen sich drei wesentliche Strömungsregime charakterisieren, wobei I und II einfache analytische Lösungen besitzen und deren Abgrenzungen fließend sind.²⁵⁶

- Im „Stokes-Regime“ (Bereich I, $Re_p < 0,25$) herrscht eine zähe Umströmung. Der Reibungswiderstand überwiegt sehr deutlich den Trägheitswiderstand. Im Stokes-Bereich gilt ein linearer Zusammenhang zwischen dem Widerstandsbeiwert und der Reynolds-Zahl.
- Im *Übergangsbereich* (Bereich II, $0,25 < Re_p < 2 \cdot 10^3$) wird die Umströmung zäh-turbulent. Mit zunehmender Geschwindigkeit wird die fluide Trägheit größer und erzeugt nach Umströmung Ablösungen und Wirbel. Eine geschlossene physikalische Funktion für den Bereich ist bisher nicht bekannt. Es existieren für eine Reihe von Problemstellungen aber zahlreiche empirische Näherungsfunktionen.
- Das „Newton-Regime“ (Bereich III, $1 \cdot 10^3 < Re_p < 2 \cdot 10^5$) zeichnet sich durch eine vollausgebildete turbulente Strömung aus. Der resultierende Strömungswiderstand

²⁵³ Osborne Reynolds (1842-1912) war ein britischer Physiker.

²⁵⁴ Wie in der Erläuterung der Grundgleichungen der Strömungsmechanik (Navier-Stokes-Gleichung) zu erkennen, sind analytische Ergebnisse der Bewegungen und Impulse sehr komplex. Durch die Bildung dimensionsloser Kennzahlen lassen sich mechanisch gleiche Zustände evaluieren, ohne die exakten Bedingungen modellieren zu müssen. Es sei an dieser Stelle auf entsprechende Sekundärliteratur (Spurk 1992; BUCKINGHAM 1915) verwiesen.

²⁵⁵ Vgl. Schlichting und Gersten 2006, 4ff.

²⁵⁶ Stieß 2009, 108f.

beruht überwiegend auf den Trägheitskräften. Der Widerstandsbeiwert ist unabhängig von der Reynolds-Zahl und konstant.

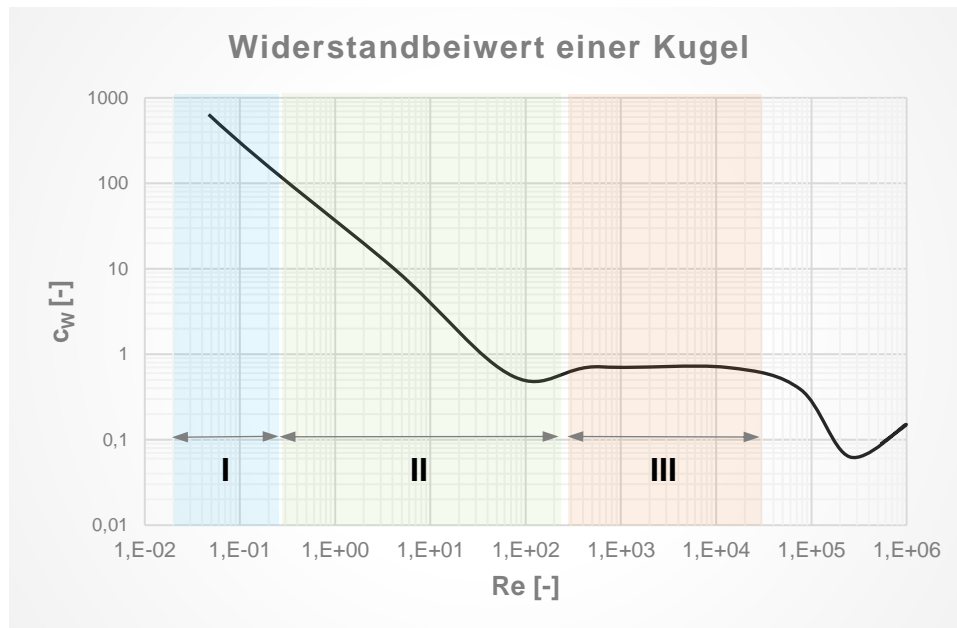


Abb. 5-3: Widerstandsbeiwert c_W in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl; markiert sind die drei wesentlichen Strömungsregime I-Stokes-Bereich, II-Übergangsbereich, III-Newton-Bereich²⁵⁷

Bei weiterer Steigerung der Reynolds-Zahl fällt der Widerstandsbeiwert ab. Dies ist vor allem auf die Änderungen der laminaren Grenzschicht auf der Vorderseite der Kugel zurückzuführen. Alle Strömungsregime mit ihren Funktionalberechnungen sind in Tab. 5-1 zusammengefasst.

Tab. 5-1: Berechnungsvorschriften für den Widerstandsbeiwert in unterschiedlichen Strömungsregimen²⁵⁸

Regime	Reynolds-Zahl	c_W -Berechnung
Bereich I Stokes-Regime	$Re_p < 0,25$	$c_W = 24/Re_p$
		$c_W = 24/Re_p + 4/\sqrt{Re_p} + 0,4$
Bereich II Übergangsbereich	$0,25 < Re_p < 2 \cdot 10^3$	$c_W = 21/Re_p + 6/\sqrt{Re_p} + 0,28$
		$c_W = 24/Re_p + 5,66/\sqrt{Re_p} + 0,33$
Bereich III Newton-Regime	$1 \cdot 10^3 < Re_p < 2 \cdot 10^5$	$c_W \cong 0,44$

Die zuvor gezeigten Analysen der Reynolds-Zahlen und deren angegebene Berechnungsgleichungen gelten für ideale kugelförmige Körper. Wie in Kapitel 4 durch Untersuchungen der Partikel gezeigt wurde, ist ein Großteil der Partikel nicht durch eine Kugelform zu beschreiben. Die Abweichung von der Kugelform kann durch die Sphärizität und die Rundheit

²⁵⁷ Eigene Darstellung. Vgl Stieß 2009, S. 109.

²⁵⁸ Bei Reynolds-Zahlen $1 \cdot 10^3 < Re_p < 2 \cdot 10^3$ kann keine eindeutige Unterscheidung zwischen Bereich I und II getroffen werden. Im Zweifel muss eine empirische Überprüfung des Widerstandsbeiwerts erfolgen Vgl. Stieß 2009, S. 110; Schlichting und Gersten 2006, S. 16.

beschrieben werden. Darauf basierend sind Modelle empirisch untersucht worden, die anhand von Näherungsfunktionen diese Abweichung mit dem Widerstandsbeiwert korrelieren.

Die Gestaltabweichung kann bestimmt werden mittels der Sphärizität, s. Kap. 4.4.1, über den formalen Zusammenhang in Gleichung (5-11).²⁵⁹

$$c_W = 0,44k_{New} \quad (5-11)$$

mit

k_{New} : Korrekturfaktor im Newton'schen Strömungsbereich; $k_{New} = 10^{1,8148(-\log\Psi)^{0,5743}}$

Ψ : Sphärizität nach (4-22)

Bei Strömungen außerhalb des Newton-Regimes zeigen sich die Widerstandsbeiwerte unempfindlich gegenüber der Formabweichung von der Kugel.²⁶⁰

5.1.3 Geschwindigkeitsprofil der ebenen Plattenströmung

Unter einer ebenen Plattenströmung wird eine Strömung von definierter Höhe parallel zu einem flachen Untergrund verstanden. Außerhalb der Flüssigkeitsphase herrscht Umgebungsdruck. Anhand dieser Randbedingung wird auf das Geschwindigkeitsprofil eingegangen, welches sich in Wandnähe ausbildet. Bereits in Gleichung (5-7), die die Berechnung der Mindestgeschwindigkeit im Falle einer Auftriebskraft, beschreibt, wurde vereinfachend angenommen, dass die Geschwindigkeit in der Partikelmitte 50 % der Fluidgeschwindigkeit entspricht. Ob diese Vereinfachung gerechtfertigt ist, kann mittels der Grenzschichttheorie untersucht werden.²⁶¹

Im Grenzfall sehr großer Reynolds-Zahlen überwiegt die Trägheitskraft. Es bildet sich auf der Oberfläche eines Körpers eine dünne Grenzschicht aus, in der die Geschwindigkeit von der reibungsfreien Außenströmung auf den Wert Null an der Wand (Haftbedingung) verzögert wird. Die Grenzschicht ist dabei um so dünner, je kleiner die Zähigkeit ist. In der Grenzschicht entsprechen die Reibungskräfte der Größenordnung der Trägheitskräfte.²⁶²

Das sich ausbildende Geschwindigkeitsprofil ist in Abb. 5-4 dargestellt. Das Diagramm zeigt die Geschwindigkeitskomponente in relativen Größen zur unbeeinflussten Strömung des Fluids in Abhängigkeit des Wandabstands. Dargestellt ist auch die Grenzschichtdicke δ , die die Höhe der 99-prozentigen Geschwindigkeit von v_F abbildet. Der funktionale Verlauf des Geschwindigkeitsprofils kann mittels einer quadratischen Gleichung angegeben werden, die der Gleichung (5-12) folgt.²⁶³

$$\frac{v_F(z)}{v_F} = 1 - \left(\frac{\delta - z}{\delta} \right)^2 \quad (5-12)$$

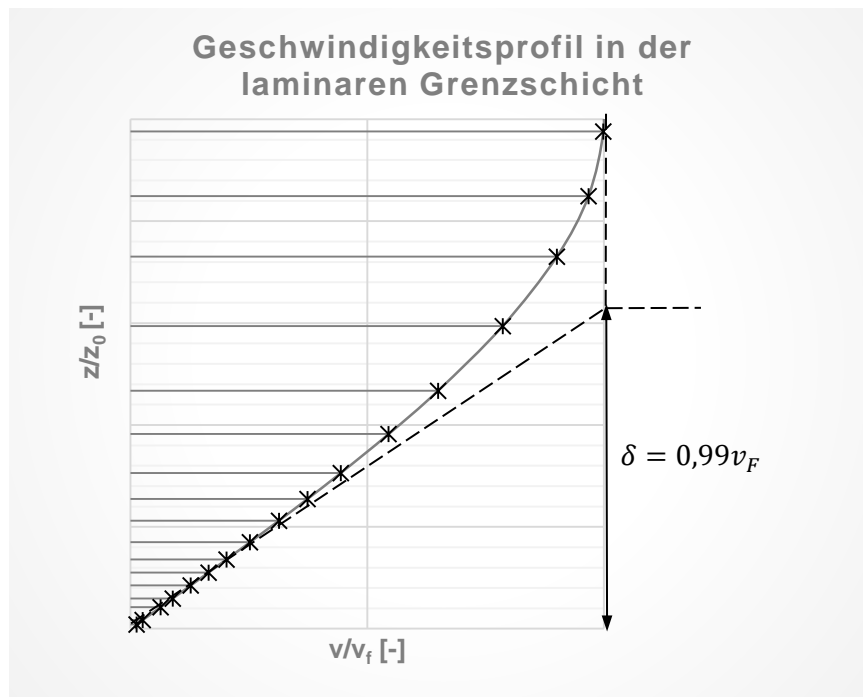
²⁵⁹ Vgl. Hölzer 2007, S. 70.

²⁶⁰ S. Kraume 2012, S. 197.

²⁶¹ Die Grenzschichttheorie wurde vom deutschen Ingenieur Ludwig Prandtl (1875-1953) begründet. In einer Veröffentlichung (Prandtl und Betz 2010; Vortrag von 1904) zeigte er erstmalig die Unterschiede des Reibungseinflusses in einer wandnahen Schicht.

²⁶² S. Oertel 2017, S. 126.

²⁶³ S. Sigloch 2017, S. 97.

Abb. 5-4: Geschwindigkeitsprofil in der laminaren Grenzschicht²⁶⁴

Die Geschwindigkeitsverteilung der Grenzschicht ist hiermit definiert und wird bei der Betrachtung eines umgelenkten Prallstrahls in Abschnitt 5.3.1 erneut aufgegriffen.

5.2 Transport- und Grenzflächenphänomene mizellarer flüssig/flüssig-Systeme

Im vorigen Unterkapitel wurden die minimalen Fluidgeschwindigkeiten für den Fall analysiert, dass nur partikuläre Verunreinigungen vorhanden sind und entfernt werden müssen. Wie bereits gezeigt, können die Kapillarkräfte, verursacht durch filmische Verunreinigungen, die reinen Haftkräfte der Partikel um Größenordnungen $\mathcal{O}(10^3)$ übertreffen. Um diese Kapillarkräfte und die dafür benötigten Geschwindigkeiten für entsprechende Strömungswiderstände zu überwinden, liegen an der Grenze zum technisch machbaren. Energetisch effiziente Prozesse sind dadurch nicht mehr möglich.

Der weitaus effizientere Mechanismus, und in der Praxis auch am häufigsten eingesetzt, ist die Lösung der filmischen Verunreinigung durch Stofftransportsysteme. Dabei werden Konzentrationsunterschiede von Stoffgemischen erzeugt, die einen Stofftransport erzwingen. Das Grundproblem der wässrigen Reinigung ist dabei, die Hydrophobie vorhandener Fette und Öle der Verunreinigungen, s. Abschnitt 4.1.2. Dies hängt mit der physikochemischen Struktur des polaren Wassers und der unpolaren Fette bzw. Öle zusammen.²⁶⁵

Um eine Reinigung von hydrophoben Stoffen mit Wasser trotzdem zu erreichen, werden grenzflächenaktive Substanzen²⁶⁶, wie Tenside, genutzt, um eine Lösung und einen Transport zu ermöglichen.

²⁶⁴ Eigene Darstellung. Vgl. Sigloch 2017, S. 96.

²⁶⁵ S. Gray et al. 2011, S. 761.

²⁶⁶ Grenzflächenaktive Substanzen oder Stoffe sind Verbindungen, die an Phasengrenzen stark angereichert werden.

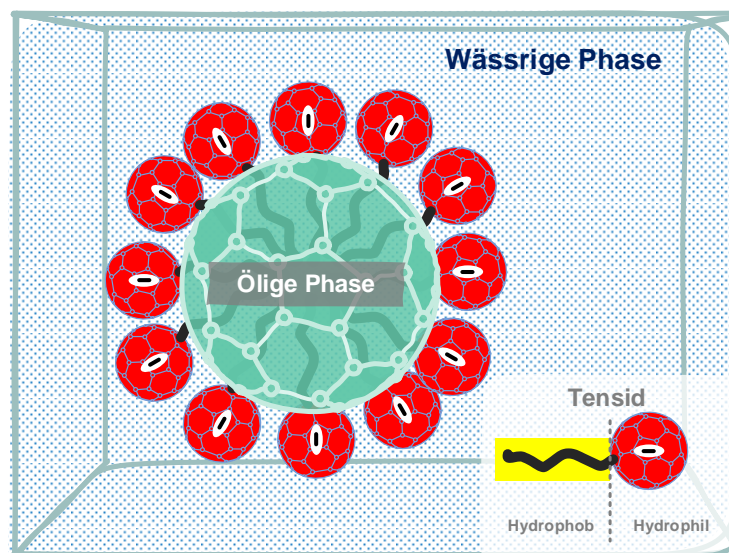


Abb. 5-5: Schematische Darstellung einer Mizelle aus Tensidmolekülen mit „gelöster“ Ölphase und Wasser als Dispersionsmedium²⁶⁷

5.2.1 Stofftransport in Wasser-Öl-Tensid-Systemen

Die filmischen Verunreinigungen werden durch die freie Oberflächenenergie an die Bauteiloberfläche gebunden. Um diese Bindungen und die kohäsiven Anteile der Fluidphasen zu überwinden, müssen sie von den grenzflächenaktiven Substanzen adsorbiert werden. Thermodynamisch betrachtet, handelt es sich dabei um eine Grenzflächenadsorption.²⁶⁸

Phänomenologisch kann dieser Prozess durch die mathematische Formulierung der freien Gibbs²⁶⁹-Enthalpie²⁷⁰ erklärt werden, Gleichung (5-13).

$$dG = -SdT + Vdp + \sum_i \mu_i dn_i + \gamma dA_o \quad (5-13)$$

mit

S : Systementropie

T : Temperatur

V : Systemvolumen

μ_i : Chemisches Potenzial der Phase i ; $d\mu_i = -RT d\ln c_i$

n_i : Stoffmenge der Phase i

A_o : Oberfläche

Die freie Gibbs-Enthalpie, oder auch freie Gibbs-Energie, stellt ein thermodynamisches Potenzial dar. Wird ein System aus zwei flüssigen Substanzen A und B betrachtet, für den Fall, dass sich keine Temperatur- und Drückänderungen einstellen ($dT = dp = 0$), lässt sich aus (5-13) ableiten, dass eine stoffliche Trennung von A und B nur mit einer Vergrößerung der Oberfläche einhergeht. Dafür wird über die Oberflächenspannung als Proportionalitätsfaktor Energie

²⁶⁷ Eigene Darstellung. Vgl. Paul 2014, S. 11.

²⁶⁸ Vgl. Rosen und Kunjappu 2012, S. 67.

²⁶⁹ Josiah Willard Gibbs (1839-1903) war ein US-amerikanischer Physiker und hat durch seine Arbeiten eine bedeutende Grundlage für die physikalische Chemie geschaffen.

²⁷⁰ Lauth 2016 S. 59

zugeführt. Werden die Definitionen für das chemische Potenzial und den Grenzflächenüberschuss eingeführt, entsteht die Gibbsche Adsorptionsisotherme²⁷¹ in Gleichung (5-14).

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial c_S}\right)_T = -\frac{RT\Gamma_S}{c} \quad (5-14)$$

mit

c_S : Konzentration der Substanz S

R : Universelle Gaskonstante

Γ : Grenzflächenüberschuss; $\Gamma = n_i(A)/A$

Mittels der Adsorptionsisotherme wird in Lösungen grenzflächenaktiver Verbindungen aus der Grenzflächenspannungs-Konzentration die adsorbierte Substanzmenge an grenzflächenaktiven Stoffen berechnet. Weiterhin lässt sich ableiten²⁷²:

- Reichert sich die gelöste Substanz in der Grenzschicht an ($\Gamma_S < 0$), dann wird die Grenzflächenspannung kleiner.
- Wird umgekehrt die gelöste Substanz in der Grenzschicht abgereichert ($\Gamma_S > 0$), dann steigt die Grenzflächenspannung.

Aus dem Verlauf der Adsorptionsisotherme kann auf das Lösungsverhalten der Substanzen geschlossen werden. Ist das Dispersionsmedium Wasser, wird von hydrophilem, hydrophobem und amphiphilem Verhalten gesprochen. Tenside zeigen typischerweise ein amphiphiles Verhalten²⁷³, das heißt hydrophiles und gleichzeitig hydrophobes Verhalten. Werden solche Tenside in Lösung gegeben, werden sie zunächst an die Oberfläche gedrängt und senken dabei die Grenzflächenspannung ab. Ab Erreichen einer gewissen Konzentration, der kritischen Mizellbildungskonzentration (cmc, engl. für critical micelle concentration), bilden sich in der Lösung Mizellen aus. Das bedeutet, innerhalb der Lösung entwickeln sich durch diese Mizellen neue Grenzflächen, und die an der Oberfläche der Lösung gemessene Grenzflächenspannung ändert sich durch die weitere Zugabe an Substanz nur geringfügig.²⁷⁴

Zustande kommt dieses Verhalten durch die Molekülstruktur der Tenside. Wie in Abb. 5-5 dargestellt, besitzen Tensidmoleküle einen hydrophoben und einen hydrophilen Teil. Enthält der hydrophile Teil in seiner Strukturformel Ionen, wird auch von ionischen Tensiden gesprochen – im anderen Fall von nichtionischen Tensiden. In der Regel ist der hydrophobe Molekülbereich gleichzeitig auch lipophil, das heißt, er ist gut in unpolaren Fetten und Ölen löslich. Diese Eigenschaft führt dazu, dass Lipide von diesen Molekülen adsorbiert werden können. Ab der cmc ermöglichen die Tenside die Emulsionsbildung mit Ölen und Fetten in Wasser. Um die Stofftransporte genauer analysieren und berechnen zu können, die bei diesem Mizellenbildungsmechanismus ablaufen, müssen die Vorgänge der Diffusion erläutert werden.

²⁷¹ S. Atkins et al. 2013.

²⁷² Vgl. Lauth und Kowalczyk 2016, S. 61.

²⁷³ Vom altgriechischen *amphi* für „auf beiden Seiten“ und *philos* für „liebend“

²⁷⁴ Vgl. Lauth und Kowalczyk 2016, S. 62.

Formalisiert werden können Diffusionsvorgänge durch das 1. und 2. Ficksche Gesetz²⁷⁵, wie sie durch die Gleichungen (5-15) und (5-16) gegeben sind.

$$\dot{n}_A = -D_{AB} \frac{dc}{dz} \quad (5-15)$$

mit

\dot{n}_A : Stofftransport

D_{AB} : Diffusionskoeffizient

dc/dz : Konzentrationsgradient in der Raumrichtung z

$$\left(\frac{\partial c_A}{\partial t} \right) = -D_{AB} \frac{\partial^2 c_A}{\partial y^2} \quad (5-16)$$

mit

c_A : Konzentration der Substanz A in einem Lösungsmittel B

Das erste Gesetz (5-15) beschreibt stationäre Vorgänge durch einen Konzentrationsgradienten bedingten Stofftransport eines Stoffes A, der in einem Lösungsmittel B gelöst ist. Das zweite Ficksche Gesetz (5-16) ermöglicht die Berechnung des Stofftransportes für instationäre Prozesse mit zeitlich variabler Konzentration in den Raumrichtungen.²⁷⁶ Sowohl für stationäre als auch instationäre Vorgänge ist der Proportionalitätsfaktor der Diffusionskoeffizient D_{AB} , der Stoffspezifika und die physikalischen Randbedingungen umfasst. Mit der Einheit $[m^2/s]$ ergibt der Koeffizient eine Beziehung über den zeitlichen Massentransport über eine normalisierte Fläche. Die größte Abhängigkeit des Koeffizienten zeigt sich beim Aggregatzustand der gelösten Stoffe, wie Tab. 5-2 zeigt.

Tab. 5-2: Größenordnung der Diffusionskoeffizienten für unterschiedliche Aggregatsysteme²⁷⁷

Diffusionskoeffizient [m ² /s]	Mittlere Wegstrecke dz für 10 ⁵ s (ca. 1 Tag)	System
< 10 ⁻⁴	Einige Meter	Gas
10 ⁻⁹	Einige Zentimeter	Flüssigkeiten, H ₂ in Metallen
10 ⁻¹⁹	Einige Mikrometer	Festkörper
10 ⁻²⁴	Einige Nanometer	Metalle bei tiefen Temperaturen

Triebkraft der Diffusion ist der Konzentrationsunterschied. Der Stofftransport erfolgt dabei im Unterschied zu Impuls oder Energie nicht durch Zusammenstöße, sondern ausschließlich durch Molekülbewegungen. Den Ansatz zur Beschreibung der Diffusion durch die Brownsche

²⁷⁵ Adolf Fick (1829-1901) war ein deutscher Physiologe der durch empirische Forschung auf die nach ihm benannten Zusammenhänge der Diffusion kam.

²⁷⁶ In Gleichung (5-16) wurde nur der Zusammenhang für eine Raumrichtung angegeben.

²⁷⁷ S. Lauth und Kowalczyk 2016, S. 150.

Molekularbewegung und eine wesentliche Verbesserung zur Bestimmung von Diffusionskoeffizienten liefert die Einstein²⁷⁸-Stokes-Relation (5-17).²⁷⁹

$$D_{AB} = \frac{k_B T}{6\pi\eta a} \quad (5-17)$$

mit

k_B : Boltzmannkonstante

T : Temperatur

η : Dynamische Viskosität

a : Teilchenradius

5.2.2 Temperatureinfluss auf die Transport- und Grenzflächenphänomene

In den Analysen der Grenzflächen- und Transportphänomene wurden die jeweiligen theoretischen Zusammenhänge erläutert und abgeleitet. Dabei wurde der Einfluss von Umgebungsbedingungen bewusst abgegrenzt, um das grundlegende Verständnis der komplexen Vorgänge zu fördern. An dieser Stelle soll der Temperatureinfluss auf die zuvor beschriebenen physikalischen Größen Viskosität, Oberflächenspannung und der kritischen Mizellenkonzentration analysiert werden.

Da sowohl bei der Diffusion, s. Gleichung (5-17), als auch bei den strömungsmechanischen Untersuchungen, s. Gleichung (5-1), die innere Reibung der Fluide ein entscheidender Parameter ist, soll der Einfluss der Temperatur auf die dynamische Viskosität beschrieben werden. Die Temperatur ist reziprok proportional zum Logarithmus der Viskosität, wobei der funktionale Verlauf vom jeweiligen Stoffsystem abhängt.²⁸⁰ So sind die Fließ- und Schmiereigenschaften von Ölen und Fetten direkt von der Temperatur abhängig und werden im Falle von Schmierölen durch den Viskositätsindex angegeben.²⁸¹ Als Wertebeispiel ist die Viskosität für Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen in Tab. 5-3 angegeben.

Tab. 5-3: Viskosität η von Wasser bei verschiedenen Temperaturen

Temperatur	η [mPa/s]
Wasser (5 °C)	1,52
Wasser (10 °C)	1,297
Wasser (20 °C)	1,00
Wasser (25 °C)	0,891

²⁷⁸ Albert Einstein (1879-1955) war ein deutsch-amerikanischer theoretischer Physiker und gilt als einer der bedeutendsten Wissenschaftler auf diesem Gebiet.

²⁷⁹ S. Einstein 1905, S. 555 Einstein schuf als Erster die Vorstellung des chemischen Potenzials als Kraftwirkung zur Molekularbewegung. Verbunden mit einer Strömung im Stokes-Regime ergibt sich die oben genannte mathematische Beziehung.

²⁸⁰ Vgl. RAMAN 1923.

²⁸¹ Vgl. Gerthsen 2008, S. 87.

Mit der Temperaturabhängigkeit der Viskosität kann indirekt und direkt auf die Diffusionsraten beim Stofftransport Einfluss genommen werden, wie aus der einsteinschen Berechnung zum Diffusionskoeffizienten, Gleichung (5-17), erkennbar ist.

Die Abhängigkeit von Oberflächenspannung und Temperatur kann durch die Eötvös²⁸²-Regel bestimmt werden, Gleichung (5-18).²⁸³

$$\gamma = k_E(T_C - T_\theta - T) \quad (5-18)$$

mit

k_E : Eötvös-Konstante

T_C : Kritische Temperatur

T_θ : Stoffabhängige, konstante Temperatur

T : Temperatur

Die Grenzflächenspannung verringert sich mit steigender Temperatur. Als Richtwert gilt, dass pro K Temperaturanstieg die Grenzflächenspannung um 10^{-5} bis 10^{-4} [Jm⁻²] abnimmt. Diese Tendenz setzt sich bis zum kritischen Punkt der Flüssigkeit fort, bei dem die Grenzflächenspannung null wird. Weit unterhalb der kritischen Temperatur ist die Abnahme weitgehend linear und proportional zur Temperaturerhöhung.²⁸⁴

Mit der geringeren Grenzflächenspannung geht über den Zusammenhang aus (5-14) eine geringere zu erreichende Konzentrationsdifferenz hervor, um die für den Stofftransport benötigten Mizellen zu erzeugen. Des Weiteren wird eine Benetzung der Oberflächen mit grenzflächenaktiven Stoffen durch eine verminderte Grenzflächenspannung deutlich erleichtert. Die Diffusionsprozesse können dadurch wesentlich beschleunigt werden.

Beide Temperaturabhängigkeiten (Viskosität und Oberflächenspannung) haben Einfluss auf den Mizellenbildungsmechanismus. Dieser entropische Vorgang der Mizellenbildung hängt, wie oben gezeigt, von der Konzentration und der Temperatur ab. Dies lässt sich veranschaulichen, wenn die Grenzkurve der Mizellbildung über der Temperatur aufgetragen wird, wie es in Abb. 5-6 dargestellt ist.

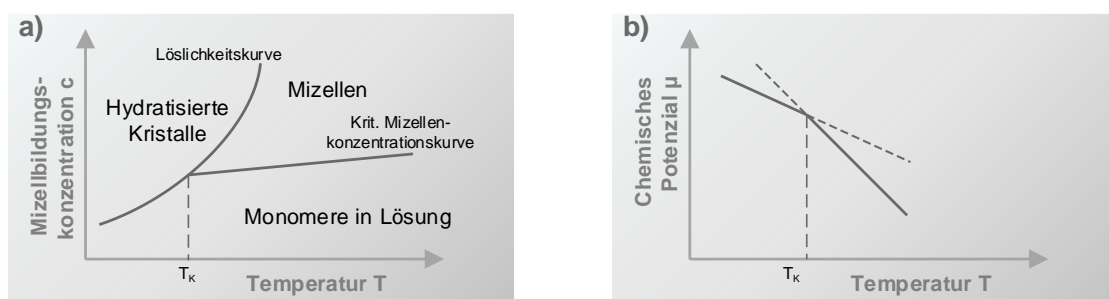


Abb. 5-6: a) Grenzkurve zur Mizellbildung über der Temperatur; b) Chemisches Potenzial eines Tensids mit Krafft-Point²⁸⁵ bzw. Trübungspunkt²⁸⁶

²⁸² Lorand Eötvös (1848-1919) war ein ungarischer Physiker.

²⁸³ Vgl. Lauth und Kowalczyk 2016, S. 67.

²⁸⁴ Lauth und Kowalczyk 2016, S. 65.

²⁸⁵ Friedrich Krafft (1852-1923) war ein deutscher Chemiker.

²⁸⁶ Eigene Darstellung. Vgl. Lauth und Kowalczyk 2016, 403f.

Anhand der vorliegenden Mizellbildung in Abhängigkeit von der Temperatur lassen sich Eigenschaften dieser Stoffklasse, wie der Tenside, zeigen. Im Diagramm Abb. 5-6 a) ist die Mizellkonzentration über der Temperatur abgebildet. Im Diagramm befinden sich auf der rechten Seite bei geringer Konzentration einzelne Monomere in Lösung. Erhöht sich die Konzentration der Tensidmoleküle, beginnt ab der cmc die Mizellenbildung. Verringert sich die Temperatur schrittweise, werden mit Überschreitung der Löslichkeitskurve zunehmend die Moleküle auskristallisieren. Wird zur Herleitung dieses Zusammenhangs das chemische Potenzial aus Gleichung (5-13) verwendet, gelangt man zum isentropen Umwandlungspunkt bei der kritischen Temperatur, der auch Krafft²⁸⁷-Punkt genannt wird.²⁸⁸

Über die Steigerung der Temperatur können drei Transportfaktoren der filmischen Verunreinigungen beeinflusst werden. Dies zeigt sich als Reduzierung der Kapillarkräfte der Partikelhaftung. Eine Berechnung dieser Effekte erfolgt abschließend in Unterkapitel 5.4.

5.3 Erzeugung kritischer Fluidgeschwindigkeit für Partikeltransporte

Im Unterkapitel 5.1 wurde die Fluidgeschwindigkeit beschrieben und definiert, um mittels kinetischer Energie eines Fluids die Bindungskräfte eines Partikels auf einer Oberfläche zu überwinden und es damit zu entfernen. An dieser Stelle sollen die Vorgänge beschrieben werden, wie diese kinetische Energie bereitgestellt werden kann und welche phänomenologischen Energiedissipationen dabei in Erscheinung treten. Aus dieser Analyse lassen sich die Einzeltherme E_{ti} aus Gleichung (3-4) ermitteln. Die Untersuchungen beziehen sich auf die logische Technologiebegrenzung der Spritzreinigungsverfahren der wässrigen Bauteilreinigung.

5.3.1 Impulsübertragung von axialsymmetrischen Spritzstrahlen auf eine ebene Wand

Beim Spritzreinigen wird durch Düsenöffnungen in Zuführungsleitungen in der Reinigungskammer das Reinigungsfluid auf die Bauteile gespritzt. Um die erforderliche Mindestgeschwindigkeit v_{Fmin} zu ermitteln, müssen die Umlenkvorgänge und Strömungsvorgänge analysiert werden, die vom Spritzstrahl ausgehen. Die wesentlichen Charakteristika und Variablen lassen sich analysieren, indem ein axialsymmetrischer Prallstrahl untersucht wird und als ebene Staupunktströmung definiert wird.²⁸⁹ Eine schematische Darstellung des umgelenkten Prallstrahls ist in Abb. 5-7 zu erkennen.

²⁸⁷ Friedrich Krafft (1852-1923) war ein deutscher Chemiker.

²⁸⁸ Bei nichtionischen Tensiden in wässriger Lösung erfolgt beim Erreichen des Krafft-Punktes eine Trübung des Gemisches, da die Mizellengröße im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt. Es wird hier häufig auch von Trübungspunkt bzw. Trübungstemperatur gesprochen. S. Lauth und Kowalczyk 2016, S. 404.

²⁸⁹ Es sei hier auf Sekundärliteratur, wie Schlichting und Gersten 2006, 110ff, verwiesen. Die exakte Lösung der Navier-Stokes-Gleichung ist möglich, da die Definition der Randbedingungen der transformierten Koordinaten – durch Einbeziehung einer von der Viskosität abhängigen Geschwindigkeitskomponente $[v_F = V_F f(\eta \propto \sqrt{1/\nu z})]$ – möglich ist $\eta(z=0) = 0$

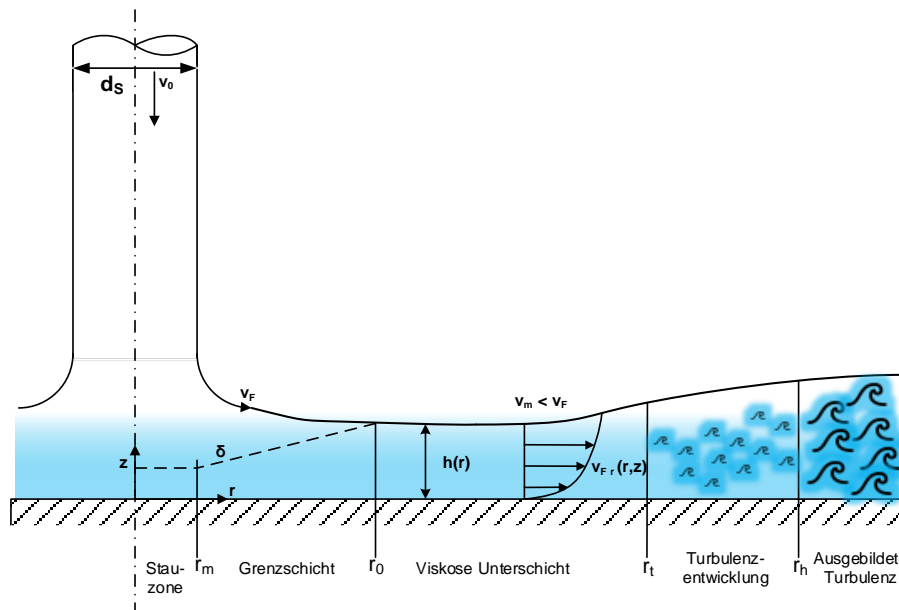


Abb. 5-7: Schematische Darstellung eines umgelenkten Prallstrahls mit ebener Staupunktströmung²⁹⁰

Die Darstellung des Prallstrahls zeigt im (r,z) -Koordinatensystem fünf unterschiedliche Strömungsregime und Eigenschaften, die im Folgenden näher beschrieben werden sollen. Die Koordinaten sind so gewählt, dass im Punkt $(0,0)$ die Längsachse des Fluidstrahls und die Umlenkoberfläche liegen. Der Prallstrahl trifft auf die Oberfläche und breitet sich radial von der Strahlachse aus. Dabei führt die Verteilung des Massenstroms auf eine immer größer werdende Fläche zur kontinuierlichen Reduzierung der Filmhöhe des ebenen Wandstrahls, wie er in Abb. 5-7 ab r_m zu erkennen ist.

Im Bereich $(r < r_m)$ liegt die Stauzone. Hier wird in Folge der Viskosität, vor allem im Bereich der Strahlachse, ein Staudruck aufgebaut, der die Geschwindigkeit gegen null gehen lässt. Mit größeren Abständen zur Strahlachse nimmt der Staudruck kontinuierlich ab. In gleichem Maße verringert sich die Beeinflussung der Fluidgeschwindigkeit.²⁹¹ Beide Parameter sind schematisch im Bereich der Stauzone in Abb. 5-8 dargestellt.

²⁹⁰ Eigene Darstellung. Vgl. Lienhard 2006, S. 8.

²⁹¹ Vgl. Schach 1935, S. 57; Glazik et al. 2015, 321f.

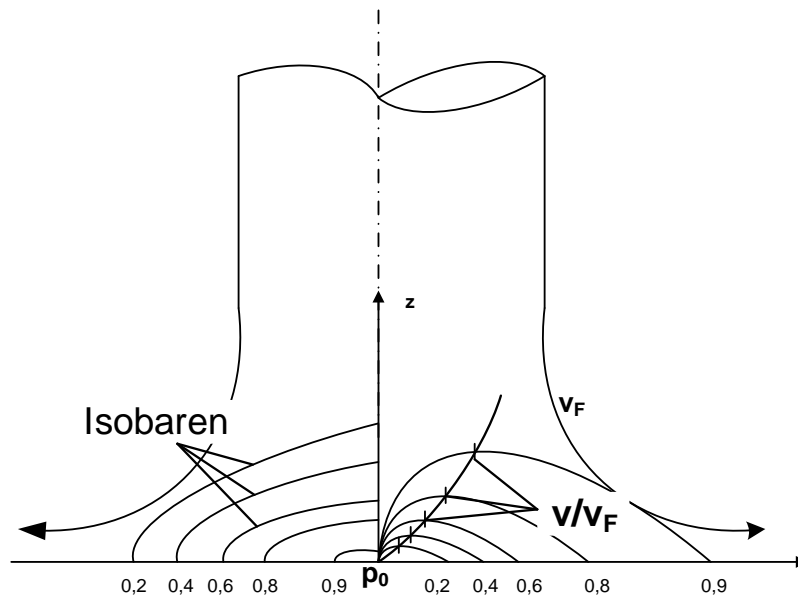


Abb. 5-8: Darstellung der Stauzone einer ebenen Staupunktströmung mit den Isobaren gleicher Druckverhältnisse p/p_0 und den jeweiligen Maxima der Isotachen der Geschwindigkeitsverhältnisse v/v_F ²⁹²

Der Bereich ($r_m < r < r_0$) ist durch eine laminare Grenzschicht gekennzeichnet, deren Dicke δ , s. Gleichung (5-12), kleiner ist als die Filmhöhe des Wandstrahls $h(r)$. Außerhalb der Grenzschicht fließt das Fluid parallel zur Oberfläche mit annähernder Strahlgeschwindigkeit v_F . Die laminare Grenzschichtausbildung hängt von den Strömungsbedingungen im Spritzstrahl ab, dessen Strömungseigenschaften durch die Reynolds-Zahl Re_d ausgedrückt werden.²⁹³ Der radiale Abstand mit Beginn der Grenzschicht berechnet sich durch Gleichung (5-19).²⁹⁴

$$r_0 \cong 2,23d_S \quad (5-19)$$

mit

d_S : Durchmesser des Spritzstrahls

Die Grenzschichtdicke in dem Bereich ($r < r_0$) kann durch folgenden Zusammenhang ermittelt werden, (5-20).

$$\delta = 2,679 \left(\frac{rd_S}{Re_d} \right)^{1/2} \quad (5-20)$$

Das Geschwindigkeitsprofil $v_F(r, z)$ folgt formal der Funktion (5-21).

²⁹² Eigene Darstellung. Vgl. Lienhard 1995, S. 212.

²⁹³ Die Berechnung erfolgt wie in Gleichung (5-10), nur, dass in diesem Fall für die charakteristische Länge der Durchmesser des Spritzstrahls d_S verwendet werden muss.

²⁹⁴ S. Lienhard 2006, 7f.

$$v_F(r, z) = v_m(r) \left[\frac{3z}{2\delta} - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{\delta} \right)^3 \right] \quad (5-21)$$

mit

$$v_m: \quad v_m = v_F$$

Der Bereich ($r_0 < r < r_t$) wird als viskose Unterschicht bezeichnet. Hierbei handelt es sich um die in Abschnitt 5.1.3 beschriebene Strömung. Über die gesamte Höhe des Wandstrahls überwiegen die durch die innere Fluidreibung verursachten Effekte. Die Geschwindigkeit $v_m(r)$ des Flüssigkeitsspiegels sinkt mit wachsendem radialem Abstand. Der Bereichsbeginn r_0 bei dem die Grenzschicht an die Fluidoberfläche stößt, kann berechnet werden durch Gleichung (5-22).²⁹⁵

$$r_0 = 0,1773 Re_d^{1/3} d_s \quad (5-22)$$

mit

$$v_m: \quad v_m = v_F$$

Die Geschwindigkeit auf der Fluidoberfläche $v_m(r)$ ist gegeben durch die Funktion (5-23).

$$v_m(r) = \frac{1}{5} \frac{v_F d^2}{h(r)r} \quad (5-23)$$

mit

$$h(r): \quad h(r) = 0,1713 \left(\frac{d_s^2}{r} \right) + \frac{5,147}{Re_d} \left(\frac{r^2}{d_s} \right)$$

Das Geschwindigkeitsprofil $v_F(r, z)$ im Bereich ($r_0 < r$) kann durch Einsetzen von (5-23) in (5-21) mit $\delta = h(r)$ ermittelt werden.

Durch die sich stetig reduzierende Fluidhöhe des sich radial ausbreitenden Strahls nehmen die Reibungseinflüsse stetig zu. Dies führt ab dem Radius r_t zu sich allmählich ausbildender Turbulenz. Diese Turbulenzen führen zu einer deutlichen Erhöhung der Fluidhöhe $h(r)$. Dieser Bereich $r > r_t$ wird deshalb auch Turbulenzentwicklung genannt.²⁹⁶ Der Radius r_t kann bestimmt werden durch Gleichung (5-24).²⁹⁷

$$r_t = 1200 Re_d^{-0,422} d_s \quad (5-24)$$

Ab einem Radius r_h sind die Turbulenzen voll entwickelt. Dieser Turbulenzbereich kann approximiert werden durch (5-25).²⁹⁸

$$r_h = 28600 Re_d^{-0,68} d_s \quad (5-25)$$

²⁹⁵ S. Lienhard 2006, S. 8.

²⁹⁶ S. Fußnote 174.

²⁹⁷ Vgl. Liu et al. 1991, S. 580.

²⁹⁸ S. Lienhard 1995, S. 240.

Ab diesem radialen Abstand kann das Geschwindigkeitsprofil sehr gut mit dem 1/7-Potenzgesetz für turbulente Strömungen abgeschätzt werden.²⁹⁹ Mit dieser mathematischen Beziehung lässt sich ein Funktionalzusammenhang für die Oberflächengeschwindigkeit finden, Gleichung (5-26).³⁰⁰

$$v_m(r) = \frac{1}{7} \frac{v_F d_S^2}{h_h(r)r} \quad (5-26)$$

mit

$$h_h(r): h_h(r) = d_s \left(\frac{0,02091}{Re_d^{1/4}} \left(\frac{r}{d_s} \right)^{5/4} + C \frac{d_s}{r} \right)$$

$$C: C = 0,1713 + \frac{5,147}{Re_d} \frac{r_t}{d_s} - \frac{0,02091}{Re_d^{1/4}} \left(\frac{r_t}{d_s} \right)^{1/4}$$

Die dargestellten Zusammenhänge und deren mathematische Formulierung (5-19) - (5-26) ermöglichen es, die strömungstechnischen Anforderungen zu ermitteln, um die erforderlichen Fluidgeschwindigkeiten für die Ablösungen von Partikeln zu erreichen. Wird in Gleichung (5-26) die Relation der Mindestgeschwindigkeit von (5-7) und (5-8) eingesetzt, kann die erforderliche Mindestgeschwindigkeit des Spritzstrahls bestimmt werden.

Für die Analyse des energetisch-technischen Miniums der Energieeffizienzanalyse können die ersten Terme $E_{t,i}$ ermittelt werden. Die Mindestgeschwindigkeit $v_{F,min}$ aus (5-8) korreliert mit der Äquivalenzoberfläche der Partikel und dem benötigten Fluidstrom zum Lösen der Partikel. Die Herleitung zur Impulsübertragung des axialsymmetrischen Wandstrahls ermöglicht die Berechnung der Ausgangsgeschwindigkeit des Spritzstrahls, damit diese Mindestgeschwindigkeit auf einer Oberfläche mit Abstand r von der Strahlachse wirksam ist und die Dicke des Flüssigkeitsfilms h an dieser Stelle r gerade so groß ist, dass ein ausreichender Impuls zum Entfernen der Partikel vorhanden ist.

Wie in Kapitel 4 durchgeführt, soll auch in diesem Kapitel eine Beispielrechnung am Ende die theoretischen Abhandlungen anschaulich darstellen und zusammenfassen. An dieser Stelle soll dann ebenfalls das ETM zusammenfassend berechnet werden.

5.3.2 Freistrahlen

Die Erzeugung von Freistrahlen beschreibt den Vorgang eines strömenden Fluids durch eine definierte Öffnung. Dabei kann es in das gleiche Fluid oder auch in ein Fluid mit anderen stofflichen Eigenschaften einströmen. Wesentliches Merkmal des Freistrahls ist die fehlende räumliche Begrenzung im Gegensatz zum Wandstrahl oder Eckstrahl. Die physikalische Beschreibung des Geschwindigkeits- und Druckfeldes nach der Ausströmöffnung - in den häufigsten Fällen eine Düse - hängt im Wesentlichen vom Dichteunterschied der beiden Fluide ab. Im spezifischen Fall dieser Arbeit sollen nur die Ausströmungen von liquiden Fluiden in eine Gasphase näher untersucht werden.

²⁹⁹ Vgl. AZUMA und HOSHINO 1984, S. 2757 Das 1/7-Potenzgesetz wurde empirisch vom deutschen Physiker Heinrich Blasius (1883-1970) gefunden und gibt eine Geschwindigkeitsverteilung in turbulenter Rohrströmung, s. Blasius 1908 Eine Herleitung und Weiterentwicklung ist zu finden in Schade et al. 2007, S. 347.

³⁰⁰ S. Liu et al. 1991, S. 580.

Die schematische Darstellung eines Freistrahls ist in Abb. 5-9 dargestellt.

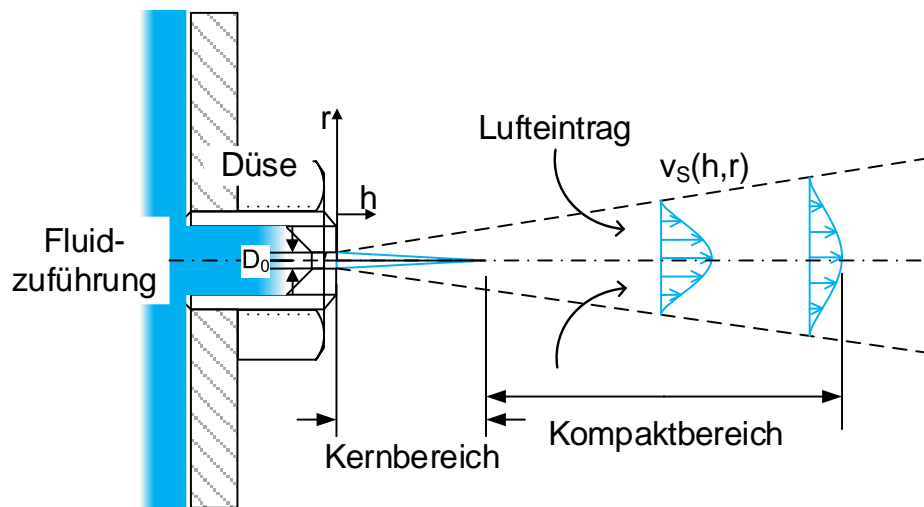


Abb. 5-9: Prinzipskizze eines Freistrahls; die Aufweitung des Strahls ist stark überzeichnet³⁰¹

Aus einer Fluidzuführung, wie einem Rohr oder Behälter, passiert das Fluid eine Querschnittsreduzierung des Strömungskanals – D_0 der Düse – in dem es auf Grund der Massenerhaltung stark beschleunigt wird. Nach der Düsenaustrittsöffnung tritt das Fluid in eine meist ruhende Umgebung. Mit dieser kommt es durch den großen Geschwindigkeitssprung zu einer starken Wechselwirkung. Die Wirkung liegt in einer massiven Reibung an den Rändern des Freistrahls, wodurch Umgebungsluft mitgerissen wird. Das Vermischen von Umgebungsluft und Strahlfluid führt zu einer Energiedissipation und zur Aufweitung des Strahlgebiets. Dadurch kommt es zu einer Geschwindigkeitsreduktion und gleichzeitig zur Abflachung des Geschwindigkeitsprofils. Der Strahl breitet sich in Form eines Kegels aus und kann in verschiedene Zonen eingeteilt werden, wie sie in Abb. 5-9 angegeben sind. Der Kernbereich zeigt die Zone an, in dem der Strahl die gleiche Geschwindigkeit wie beim Verlassen der Düse besitzt. Der anschließende Kompaktbereich zeigt eine reduzierte Geschwindigkeit bei einer begrenzten Aufweitung. Ohne Begrenzung würde anschließend eine Tropfenbildung einsetzen, bis sich der Strahl vollständig mit der Umgebung vermischt und auflöst. Dies ist bei Spritzreinigungsvorgängen nicht gewünscht, bei denen ein Auftreffen des Strahls bereits in der Kernzone mindestens aber im Kompaktbereich stattfinden soll. Wie sich der Strahl aufweitet und an welchen Punkten der Kernbereich endet, hängt sehr stark von der Düsengeometrie und den Strömungsverhältnissen vor der Düse ab.³⁰²

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass sich bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und kleinen Düsendurchmessern lange Kompaktstrahlen ausbreiten.³⁰³ Die Geschwindigkeitsreduktion ist über die Distanzen von dem 200-fachen des Düsenöffnungsdurchmessers annähernd konstant, s. Abb. 5-10. Im Fall der meisten Kompaktreinigungsanlagen kann mit der Geschwindigkeit am Düsenausgang gerechnet werden.³⁰⁴

³⁰¹ Eigene Darstellung. Vgl. Sigloch 2017, S. 106.

³⁰² S. Wu et al. 1986.

³⁰³ Vgl. Rajaratnam et al. 1994; Guha et al. 2011.

³⁰⁴ Bei einem Düsendurchmesser von 2 mm kann in einem Arbeitsbereich von 400 mm von einem Kern- oder Kompaktstrahl ausgegangen werden.

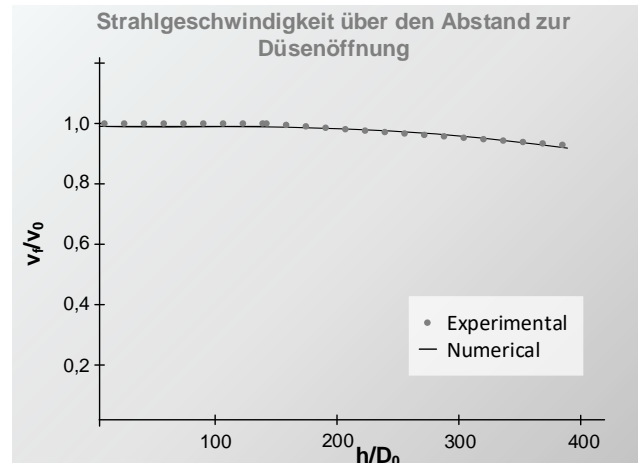


Abb. 5-10: Veränderung der maximalen Fluidgeschwindigkeit der Strahlachse ($r=0$) in Abhängigkeit zum Düsenöffnungsabstand³⁰⁵

In Abschnitt 5.3.1 wurde in Abb. 5-7 die ideale Umlenkung eines Prallstrahls dargestellt und deren Umlenkung und anschließende radiale Ausbreitung beschrieben. Die Eigenschaften eines Freistrahls zeigen, dass die bisher angenommene Konstanz des Strahldurchmessers nach Verlassen der Düse als ideales Modell angesehen werden muss. Die Aufweitung und Interaktion mit der Umgebungsluft führt zu einer veränderten Geometrie und variablen Eigenschaften des Strahls. Wie gezeigt wurde, kann die Geschwindigkeitsabnahme und die damit korrelierte Aufweitung vernachlässigt werden. Es kommt zu einem Effekt des Rückpralls von Einzeltropfen des auftreffenden Strahls. Der Anteil des zurück geworfenen Strahls wird nicht umgelenkt und verringert dadurch den Volumenstrom des sich ausbreitenden Wandstrahls.³⁰⁶

Das Verhältnis der Volumenströme des Strahls bei Durchströmen der Düse zu dem Volumen, dass von der Oberfläche nicht umgelenkt wird, sondern zurück prallt, wird kann über folgende Gleichung errechnet werden, (5-27)³⁰⁷. In der Gleichung ist eine weitere wichtige dimensionslose Kennzahl der Strömungsmechanik enthalten: die Weber³⁰⁸-Zahl.

$$\frac{Q_R}{Q_S} = \xi = -0,0935 + 3,41 \cdot 10^{-5} \omega + 2,25 \cdot 10^{-9} \omega^2 \quad (5-27)$$

mit

Q_R : Rückprallvolumenstrom

Q_S : Strahlvolumenstrom

ω : $\omega = We_S \exp\left(\frac{0,971}{\sqrt{We_S}} \frac{l}{d_s}\right)$

l : Abstand der Düsenöffnung zu Pralloberfläche (in diesem Fall die Bauteiloberfläche)

³⁰⁵ Eigene Darstellung. Die experimentellen und numerischen Ergebnisse sind aus Guha et al. 2011, S. 613 entnommen.

³⁰⁶ In der englischen Literatur wird das Verhalten des Rückpralls als „Splattering“ bezeichnet. Die wörtliche Übersetzung ins Deutsche (Spritzen) würde an dieser Stelle zu Konfusionen führen, weswegen sich der Autor für den gewählten Ausdruck entschied.

³⁰⁷ Vgl. Bhunia und Lienhard 1994, S. 339.

³⁰⁸ Moritz Gustav Weber (1871-1951) war ein deutscher Ingenieur und Professor für Mechanik des Schiff- und Schiffmaschinenbaus.

Anhand der Weber-Zahl lassen sich die Trägheits- und Oberflächenkräfte in Strömungen beschreiben. Sie ist definiert über den Zusammenhang³⁰⁹ aus Gleichung (5-28).

$$We_S = \frac{\rho_F v_F^2 d_S}{\gamma_F} \quad (5-28)$$

Wie groß ξ , s. (5-27), ist, hängt im Wesentlichen von der Weber-Zahl und dem Verhältnis von Abstand der Düse zur Umlenkoberfläche und dem Düsenöffnungsdurchmesser ab. Im ungünstigen Fall sehr hoher Weber-Zahlen und gleichzeitigem geringen Abstand der Düse zur Bauteiloberfläche kann ξ Werte von 0,75 annehmen.³¹⁰ Ein Einfluss durch das Vorhandensein von Tensiden konnte nicht festgestellt werden.³¹¹

5.3.3 Einfluss der Bauteilgeometrie auf die fluide Impulsübertragung

Die in den Abschnitten in 5.1 und 5.3 beschriebenen hydrodynamischen Vorgänge bezogen sich auf eine ebene Fläche. Dies ist in vielen technischen Anwendungen nicht der Fall. An dieser Stelle soll die strömungsändernde Wirkung von scharfen konkaven und konvexen Formen beschrieben werden, um Schlussfolgerungen für zusätzliche kinetische Energien zu treffen. Dazu soll die Analyse zur Impulsübertragung auf eine ebenen Wand (Abschnitt 5.3.1) aufgegriffen werden. Die ebene Wand soll einen Absatz mit einer scharfen Kante aufweisen. Das Strömungsprofil und die Stromlinie verändern sich in der in Abb. 5-11 dargestellten Weise.

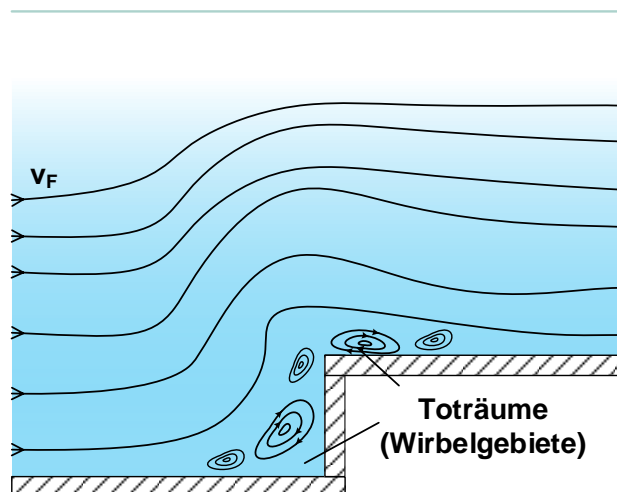


Abb. 5-11: Stromlinien an einer scharfen Kante und sich bildende Wirbelgebiete in den Toträumen³¹²

Die Umströmung von scharfen konkaven und konvexen Ecken erfolgt immer mit einer Ablösung der laminaren Grenzschicht. Ohne diese Ablösung müsste das waagrecht zuströmende Medium im unteren Totraum in der Zeit null $t \rightarrow 0$ von der endlichen Geschwindigkeit

³⁰⁹ Vgl. Eggers und Villiermaux 2008, S. 36607.

³¹⁰ Das Rückprallvolumen sollte so gering, wie möglich sein. Nur so wird der gewünschte Volumenstrom auch über die Bauteiloberfläche geführt, $\xi \rightarrow 0$

³¹¹ Vgl. Lienhard 2006; Bhunia und Lienhard 1994; Liu et al. 1991.

³¹² Eigene Darstellung. Vgl. Sigloch 2017, S. 104.

v_F (ungestörte An- oder Zuströmgeschwindigkeit) auf null verzögert und in senkrechter Richtung plötzlich von null wieder auf die endliche Geschwindigkeit v_F beschleunigt werden. Dasselbe gilt für die scharfe obere Kante. Dafür wären eine unendlich große Beschleunigung und, nach dem Newtonschen Grundgesetz, eine unendlich große Kraft notwendig, da alle Fluide massebehaftet sind. Ist entlang eines Fluidstrahles eine abgelenkte Wand so angeordnet, dass zur Strahlrichtung ein sich öffnender Keil entsteht, tritt folgende Erscheinung auf: Durch „Mitreißen“ des zwischenliegenden Totraumgebietes (zwischen Strahl und Wand) wird der Fluid(frei-)strahl zur angrenzenden Wand hin abgelenkt und bleibt bei günstigen Verhältnissen (Abstand, Winkel, Strömungsgeschwindigkeit) stromabwärts an ihr anliegend, strömt somit an der Wand entlang. Die Literatur bezeichnet diese Strahlablenkung als Coanda-Effekt.³¹³

Diese Toträume gilt es gezielt zu vermeiden, da die benötigten minimalen Strömungsgeschwindigkeiten zum Transport der partikulären Verunreinigung nicht vorhersagbar erreicht werden. Hier gilt es, den Strahlwinkel entsprechend so zu verändern, dass der Wandstrahl hindernisfrei strömt.

5.4 Berechnung der benötigten kinetische Energie und Ermittlung der Mindestprozessdauer

Wie im Kapitel 4 sollen auch an dieser Stelle die komplexen theoretischen Abhandlungen durch eine Beispielrechnung anschaulich erläutert werden. Hierzu werden die erforderlichen Fluidgeschwindigkeiten zu bestehenden Bindungskräfte einer Beispielverunreinigung berechnet. Weiterhin werden im Abschnitt 5.4.3 die erforderliche Reinigungsprozessdauer und Medientemperatur berechnet.

5.4.1 Fluidgeschwindigkeiten auf dem Bauteil

Ausgehend von dem in Unterkapitel 4.5 genutzten Beispielbauteil und der analysierten Verunreinigung mit dem daraus berechneten EPM soll an dieser Stelle das ETM anhand eines Beispiels berechnet werden. Zunächst sollen die Mindestströmungsgeschwindigkeiten zum Partikeltransport berechnet werden, die dann als Basis dienen, die Düsengeschwindigkeit des Freistrahls zu berechnen. Die Analysen sollen anhand des Beispiels mit definierter Geometrie und Oberflächen erfolgen. Die filmischen Verunreinigungen und Kapillarkräfte sollen durch einen Stofftransport durch Lösung mit Tensiden entfernt werden. Wichtigste energetische Zielgröße ist dabei die Temperatur und die Einwirkzeit. Diese geben den Rahmen für die Gesamtprozesszeiten.

Wie in Abb. 4-25 angegeben, soll ein Beispielbauteil als Referenz zur Berechnung der Fluidkräfte und Stofftransporte dienen. Die durchschnittliche Größe und Anzahl der zu entfernenden Partikel sind in Tab. 5-4 zusammengefasst. Zunächst erfolgt eine Berechnung der hydrodynamischen Kräfte nur für die Haftbedingung der reinen Partikel, also ohne filmische Verunreinigung. Die Kapillarkräfte werden gleich null gesetzt ($F_{ad\ cap} = 0$).

³¹³ Sigloch 2017, S. 104.

Ausgehend von der durch die Partikeloberflächenanalyse ermittelten Rauheiten der Grob- und Feinstruktur und der damit verbundenen adhäsiven Kräfte, können durch die abgeleiteten Fluidgeschwindigkeiten, Gleichungen (5-7) und (5-8), berechnet werden, um die Partikel zu lösen.

Tab. 5-4: Beispielhafte Partikelgrößenverteilung

Partikelklasse		Partikel zu entfernen
Durchschnittliche Größe [m]		
F	1,25E-04	138
G	1,75E-04	85
I	3,00E-04	48
H	5,00E-04	26
K	8,00E-04	12
> K	1,25E-03	5

Die benötigten Parameter des Fluids und der Partikel zur Berechnung der Fluidgeschwindigkeit $\vec{v}_{F \min}$ sind der Tab. 5-5 zu entnehmen.

Tab. 5-5: Parameter zur Bestimmung der Fluidgeschwindigkeiten

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Dichte Fluid	ρ_F	997,05	[kg/m ³]	Wasser (20 °C) ³¹⁴
Dichte Partikel	ρ_P	7762	[kg/m ³]	Stahl 1.8524 ³¹⁵
Schwerebeschleunigung	g	9,81	[m/s ²]	³¹⁶
Dynamische Viskosität	η	890,02	($\cdot 10^{-6}$) [Pa \cdot s]	³¹⁷
Asperitenabstand	λ_1	8,00	($\cdot 10^{-5}$) [m]	Messung

Damit sind alle benötigten Größen definiert und die Mindestgeschwindigkeiten können für die einzelnen Partikelgrößenklassen berechnet werden. In Tab. 5-6 sind die berechneten Werte angegeben. Zusätzlich sind neben den Haftkräften auch die Gewichtskräfte eines Partikels mit durchschnittlicher Größe enthalten, s. Tab. 5-6.

Tab. 5-6: Mindestgeschwindigkeiten zum Lösen der Partikel durch die Wirkung der Saffmann-Kraft und Widerstandskraft

Partikelgrößenklasse	$F_{ad \text{ Rab Einzel}}$ [$\cdot 10^{-9} \text{ N}$]	F_G [N]	$\vec{v}_{F \text{ Saff min}}$ [ms ⁻¹]	$\vec{v}_{F \text{ W min}}$ [$\cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$]
F	467,26	1,36E-07	40,07	127,23
G	467,72	3,72E-07	31,92	56,66

³¹⁴ S. VDI e.V. 2013, S. 176.³¹⁵ Datenblattangabe.³¹⁶ S. Fußnote 210.³¹⁷ S. Fußnote 210.

Partikel- größenklasse	$F_{ad\ Rab\ Einzel}$ [$\cdot 10^{-9} N$]	F_G [N]	$\vec{v}_{F\ Saff\ min}$ [ms^{-1}]	$\vec{v}_{F\ W\ min}$ [$\cdot 10^{-3} ms^{-1}$]
I	468,20	1,88E-06	30,84	24,19
H	468,47	8,69E-06	38,70	17,88
K	468,62	3,56E-05	51,56	16,56
> K	468,71	1,36E-04	68,99	16,25

Es wird sehr deutlich, dass zum Lösen der Partikel die Widerstandskraft deutlich überwiegt. Die Mindestgeschwindigkeit durch ein Drehmoment über den Hebelarm des mittleren Asperitenabstands liegt um etwa Größenordnungen $\mathcal{O}(10^3)$ niedriger als die Auftriebswirkung durch die Saffmann-Kraft.

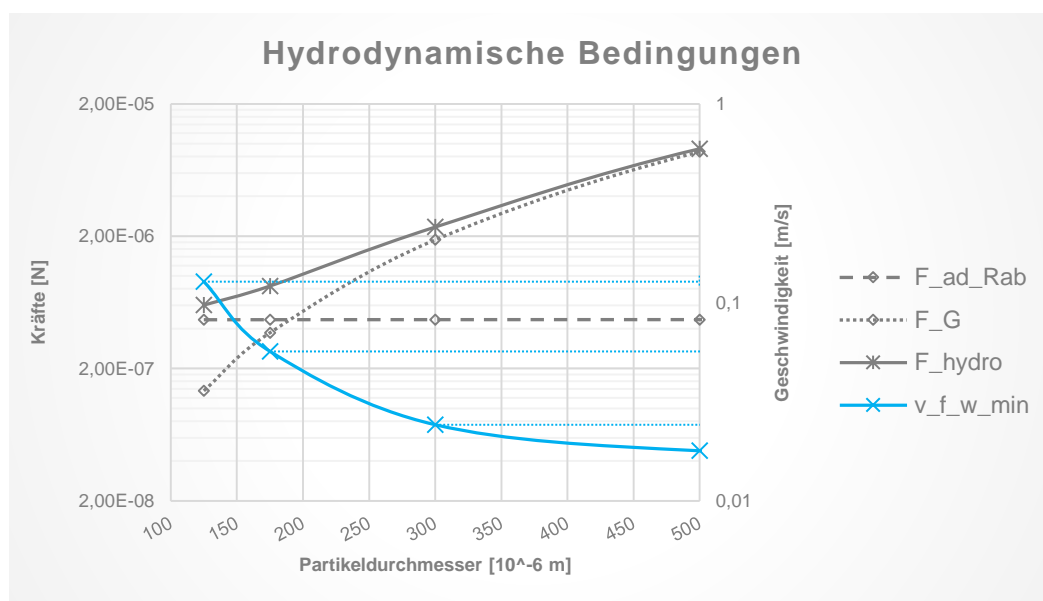


Abb. 5-12: Hydrodynamische Bedingungen in Abhängigkeit von der Partikelgröße; F_{hydro} bedeutet die Summe aus den Bindungskräften und Gewichtskräften

In Abb. 5-12 zeigt sich, dass kleinere Partikel eine größere kinetische Energie benötigen, um über hydrodynamische Effekte von Oberflächen entfernt zu werden. Dies liegt an den proportional größer werdenden Bindungskräften gegenüber den Gewichtskräften. Gleichzeitig wächst mit der Partikelgröße auch deren Angriffsfläche für den hydrodynamischen Widerstand, sodass sich die Mindestgeschwindigkeit trotz Massenzuwachs der Partikel reduziert.

Mit diesen berechneten hydrodynamischen Größen kann der erste Term E_{ti} zur Ermittlung des ETM, s. Gleichung (3-4), bestimmt werden. Aus den benötigten Fluidgeschwindigkeiten und der jeweiligen Masse der Partikel lässt sich die kinetische Energie des Fluids berechnen. Darin sind alle Verlustgrößen enthalten, die bei der Impulsübertragung des strömenden Fluids auf das Partikel überwunden werden müssen. Mit der Partikelanzahl der Beispielrechnung ergeben sich folgende kinetische Energien, s. Tab. 5-7.

Wird die Summe aller Bewegungsenergien berechnet, ergibt sich der erste Teilsummand E_{tp} des energetisch-technologischen Minimums. Die ermittelte kinetische Energie ist in Tab. 5-8 zusammengefasst.

Tab. 5-7: Kinetische Energie der Partikelgrößenklassen³¹⁸

Partikel- klasse	Durchschnittliche Größe [m]	\vec{v}_{FWmin} [$\cdot 10^{-3} ms^{-1}$]	Masse ein Partikel [kg]	Massen- summe [kg]	E_{kin} [$\cdot 10^{-3} J$]
F	1,25E-04	127,23	7,94E-09	1,10E-06	8,89
G	1,75E-04	56,66	2,18E-08	1,85E-06	2,98
I	3,00E-04	24,19	1,10E-07	5,27E-06	1,54
H	5,00E-04	17,88	5,08E-07	1,30E-05	2,08
K	8,00E-04	16,56	2,08E-06	2,50E-05	3,42
> K	1,25E-03	16,25	7,94E-06	3,81E-05	5,03

Damit ist nun für die gewählte Technologie „wässrige Bauteilreinigung“ der minimale Aufwand ermittelt worden.

Tab. 5-8: Erforderliche kinetische Energie zum Lösen der Bindungsenergie der Partikel

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Kinetische Energie des Fluids	E_{tP}	2,39	($\cdot 10^{-2}$) [J]	Bezogen auf ein Bauteil

5.4.2 Fluidgeschwindigkeiten im Freistrah

Um die Prozessspezifika zu ermitteln und damit das gesamte ETM zu berechnen, müssen die energetischen Berechnungen zur Erzeugung der Fluidbewegung erfolgen. Als Basisgröße, aus der sich die weiteren Untersuchungen ableiten lassen, dient die größte Mindestgeschwindigkeit von ca. $0,12 ms^{-1}$ der Partikelgrößenklasse F ($d_p \cong 125 \mu m$). Es muss diese Fluidgeschwindigkeit erreicht werden, um die Partikel überall auf einem Bauteil zu entfernen. Da im vorigen Unterkapitel 4.5 in der Beispielrechnung die Energiebilanzen für eine normierte Bauteiloberfläche aufgestellt wurden, soll an dieser Stelle damit fortgefahren werden. Es soll zunächst von einer ebenen kreisrunden Platte als Bauteil ausgegangen werden und es werden die strömungsmechanischen Variablen für einen axialsymmetrischen Freistrah ermittelt, der im Mittelpunkt der Platte umgelenkt wird. Der Freistrah wird durch eine Düse mit 1,65 mm Bohrungsdurchmesser d_s erzeugt.

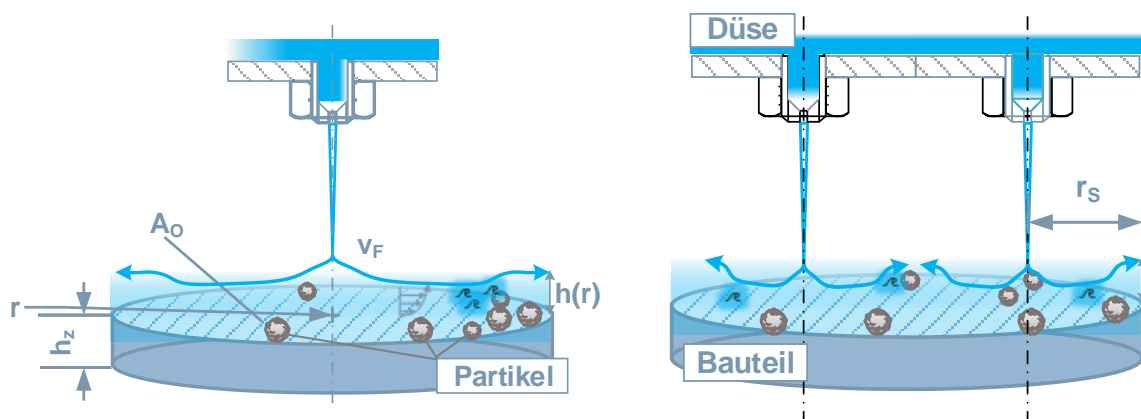
Über die in Gleichung (5-12) kann im ersten Schritt die Oberflächengeschwindigkeit des umgelenkten Wandstrahls berechnet werden. In Tab. 5-9 ist die Rechnung mit den zunächst getroffenen Annahmen aufgelistet.

³¹⁸ Die kinetische Energie ergibt sich nach den klassischen Newtonschen Axiomen zu $E_{kin} = m/2 v^2$.

Tab. 5-9: Berechnung der benötigten Freistrahlggeschwindigkeit

Parameter	Sym- bol	Wert	Einheit	Bemerkung
Geschwindigkeit an Fluid- oberfläche	v_m	0,17	[m/s]	Höhe des Wandstrahls entspricht Durchmes- ser $>K=1250\text{ }\mu\text{m}$ ³¹⁹
Oberfläche Bauteil	A_o	1000	$(\cdot 10^{-4})\text{ [m}^2\text{]}$	Bauteil wird als Kreiszylinder angenommen mit einer Höhe $h_z = 10\text{ mm}$
Radius der Grundfläche	r	0,12	[m]	$r = \frac{1}{2} \left(h_z^2 + 2 \frac{A_o}{\pi} \right)^{1/2} - \frac{h_z}{2}$
Wandstrahlhöhe	$h(r)$	1250	$(\cdot 10^{-6})\text{ [m]}$	Deklariert als benötigte Höhe für die größte Partikelklasse
Freistrahldurchmesser	d_s	1,65	$(\cdot 10^{-3})\text{ [m]}$	Entspricht dem Düsenöffnungsdurchmesser
Freistrahlg- geschwindigkeit	v_F	65,67	[m/s]	Berechnet nach Gleichung (5-26)

Diese zunächst sehr hoch wirkende benötigte Fluidgeschwindigkeit des Freistrahls wird bei näherer Betrachtung der angenommenen Flächenreinigung für einen Reinigungsstrahl wieder relativiert. Der Radius für den eine ausreichende Fluidhöhe vorhanden sein muss, ist für einen Düsendurchmesser von 1,65 mm sehr groß. Dies bedeutet aber auch, dass für den angenommen Fall mehrere Düsen und somit erzeugte Freistrahle angewendet werden müssen. In Abb. 5-13 ist der Sachverhalt schematische dargestellt.

Abb. 5-13: Vergleich der Umlenkstrahlen bei einer Düse (li.) und zwei Düsen (re.)³²⁰

Es ist anschaulich zu erkennen, dass bei einer geforderten minimalen Fluidgeschwindigkeit an jedem Punkt der Oberfläche A_o die Anfangsstrahlgeschwindigkeit im Falle einer Düse deutlich größer ausfallen muss. Dieser Umstand hat eine große Auswirkung auf die weiteren Terme $E_{t,i}$ und das ETM.

Wie stark die Abnahme der kinetischen Energie durch die radiale Ausbreitung des umgelenkten Prallstrahls ist, macht der Kurvenverlauf in Abb. 5-14 deutlich.

³¹⁹ In Gleichung (5-12) wurde für $v_F(z = 0,5d_p) = \vec{v}_{FWmin}$ definiert.

³²⁰ Eigene Darstellung.

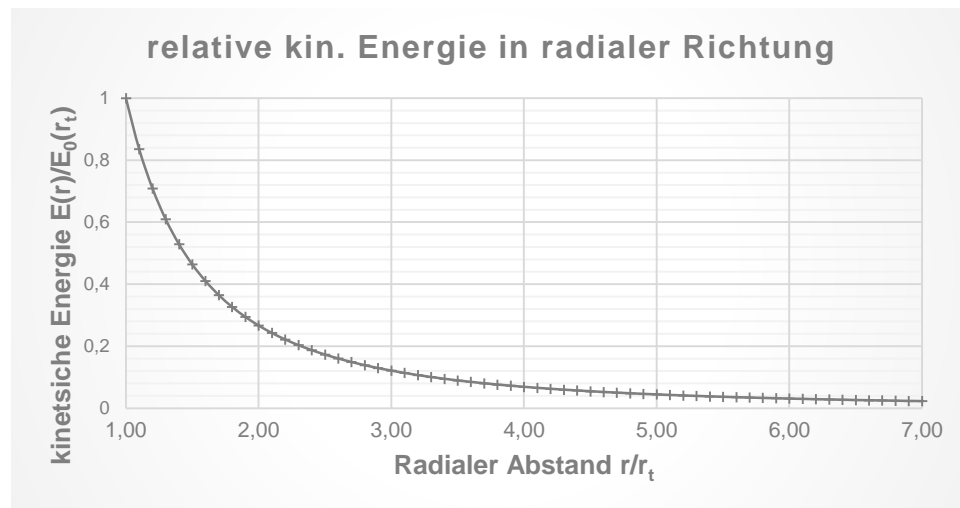


Abb. 5-14: Verlauf der kinetische Energie in Abhängigkeit des Abstands von der Strahlmitte aus; r_t ist berechnet nach Gleichung (5-19) und gibt den Abstand der ausgebildeten Grenzschicht an³²¹

Bereits bei Verdopplung des Radius verfügt jedes Volumenelement des Fluids über ca. 25 % der kinetischen Energie. Die energetischen Prozessspezifikationen des ETM der wässrigen Bauteilreinigung umfassen damit einen Term E_{tA} , der die zu reinigende Fläche pro Düse berücksichtigt.

5.4.3 Mindestprozessdauer für Lösungsvorgänge

Im Unterkapitel 5.2 wurden die Vorgänge zum Lösen von filmischen Verunreinigungen beschrieben. Dadurch können die zeitvarianten Prozesse analysiert werden und die Energiebilanzen bekommen eine zeitliche Dimension. Anhand des Beispielbauteils sollen die minimalen Prozesszeiten und die thermischen Randbedingungen evaluiert werden. In Tab. 4-6 wurden die wichtigsten Parameter der Verschmutzungen angegeben. Weitere Stoffeigenschaften und Diffusionsparameter sind zur Berechnung einer Prozesszeit erforderlich, s. Tab. 5-10.

Tab. 5-10: Parameter zur Berechnung des Stofftransports

Parameter	Sym- bol	Wert	Einheit	Bemerkung
Molare Masse Verunreinigung	M_L	0,3667	[kg/mol]	Stoffabhängig ³²²
Diffusionskonstante	D_{AB}	24	($\cdot 10^{-10}$) [m ² /s]	Stoffabhängig ³²³
Kritische Mizellenkonzentration	cmc	0,24	[mol/m ³]	Stoffabhängig ³²⁴
Maximale Überschusskonzentration	Γ_{max}	2,56	($\cdot 10^{-6}$) [mol/m ²]	Stoffabhängig ³²⁵

³²¹ Eigene Darstellung.

³²² Als Beispiel wurde n-C₂₆H₅₄-Paraffin gewählt, s. Pak und Wunderlich 2001, S. 4493.

³²³ Als Beispiel wurde das ternäre Mizellsystem Oil-Water-DDAB (Didodecyldimethylammoniumbromide) gewählt, s. Blum et al. 1985, S. 712.

³²⁴ DDAB, s. Mehta et al. 2008, S. 33.

³²⁵ S. Paul 2014, S. 59.

Parameter	Sym- bol	Wert	Einheit	Bemerkung
Molekülabstand	a	8	$(\cdot 10^{-10})$ [m]	Ergibt sich aus der maximalen Überschusskonzentration, Gleichung (5-14) ³²⁶
Stoffmenge pro Fläche	n_A	0,37	[mol/m ²]	Bezogen auf Bauteilfläche
Verteilungsfaktor	f_V	1,45	$(\cdot 10^5)$ [-]	$f_V = \frac{n_A}{\Gamma_{max}}$

Damit sind alle Unbekannten in Gleichung (5-15) ermittelt und der pro Sekunde transportierte Stoffstrom kann bestimmt werden.³²⁷ Zu berücksichtigen gilt, dass die Tensidmoleküle einen Platzbedarf benötigen und somit nur eine gewisse Menge an Verunreinigung adsorbiert werden kann. Diesem Umstand wird durch Berücksichtigung der maximalen Überschusskonzentration Rechnung getragen, der mit der Stoffmenge pro Flächeneinheit einen Verteilungsfaktor ergibt.³²⁸ Es ergibt sich eine Prozesszeit, wie sie in Tab. 5-11 angegeben ist.

Tab. 5-11: Benötigte Dauer für den Stofftransport der filmischen Verunreinigung in wässriger Lösung durch ein Tensid

Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Prozessdauer	t	1923,1	[s]

Diese sehr lange Prozesszeit kann durch eine entsprechende erzwungene Diffusion, wie es bei Spritzreinigungsvorgängen die Regel ist, deutlich verkürzt werden. Durch den permanenten Austausch des Fluids beim Überspülen der Bauteile werden die Diffusionsprozesse entsprechend forciert.³²⁹

Die vielen unterschiedlichen stoffabhängigen Parameter machen deutlich, dass es große Unterschieden zwischen verschiedenen Verunreinigungs-Reinigungs-Systemen geben kann. Jede filmische Verunreinigung erfordert im Optimalfall eine dafür angepasste Reinigungsschemie, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen.³³⁰

Aus den berechneten Variablen der Strahlgeschwindigkeit, Tab. 5-9, und der Prozesszeit, Tab. 5-11, können die technologischen Energieterme E_{tP} und E_{tL} ermittelt werden. Diese umfassen die Fluidbewegung als wässrige Emulsion mit Tensiden.

Tab. 5-12: Berechnung des ETM

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Kinetische Energie zur Erzeugung der erforderlichen Strahlgeschwindigkeit v_f	E_{tP}	301,89	[J]	Wirksam für Fluidstrom über eine Dauer von 1 s

³²⁶ S. Fußnote 221.

³²⁷ Mit $dc \stackrel{\text{def}}{=} cmc$; $dz \stackrel{\text{def}}{=} a$

³²⁸ Vgl. Wennerström 1979, S. 31.

³²⁹ Geht man von einem Volumenstrom von 1 m³/min aus, verringert sich die Prozesszeit bereits um 1/60 auf dann nur noch ca. 32 s.

³³⁰ S. Zhu et al. 2017, 178ff.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Volumenstrom bei v_F	\dot{V}	0,14	[m³/s]	Bezogen auf die Beispieldüse von 1,65 mm
Kontaktzeit des erforderlichen Volumens zur Lösung der Verunreinigung	t	7,14	[s]	Für die Umwälzung von 1 m³
Energetisch-Technologisches Minimum	ETM	2,156	(• 10³) [J]	

5.4.4 Erforderliche Reinigungstemperatur

Die Reinigungstemperatur ist eine wesentliche Einflussvariable für den Energiebedarf einer Reinigungsmaschine. Dies hängt mit den Wärmetransportvorgängen zusammen, die ausführlich im nächsten Kapitel im Abschnitt 6.2.1 erläutert werden.³³¹ Welche Temperatur benötigt wird, hängt von den vorhandenen Verunreinigungssystem und der einsetzbaren grenzflächenaktiven Substanzen ab. Wie in Abschnitt 5.2.2 hergeleitet, besitzt jedes Tensid seine individuelle minimale Temperatur, unterhalb derer sich keine Mizellenbildung einstellt. Diese Temperatur muss in jedem Fall erreicht werden. In der Literatur lassen sich für verschiedene ternäre Emulsion die Mizellbildungstemperaturen finden.³³²

In der Regel ist auch im technischen Datenblatt des Reinigers selbst die Angabe für die Einsatztemperatur vorhanden. Diese umfasst zudem auch weitere mögliche Randbedingungen für die weiteren Inhaltsstoffe des Reinigers. In den meisten Fällen für den Industrieinsatz wird sich ein Temperaturfenster im Bereich von 40 – 80 °C ergeben.³³³

Weiterhin gilt auch die in Gleichung (5-17) erläuterte Einstein-Stokes-Relation. Damit wird ein linearer Zusammenhang des Diffusionskoeffizienten mit der Temperatur eines Stoffsystems deutlich. Somit sind höhere Temperaturen für einen schnelleren Stofftransport verantwortlich.

Neben einer phänomenologischen Analyse muss die Praktikabilität der Produktionsverfahren berücksichtigt werden. Hierbei spielt Kontamination durch Lebewesen, wie Pilze und Algen eine entscheidende Rolle. Durch Temperaturen > 60 °C werden die meisten gesundheitsgefährdenden Biofilme abgetötet, sodass in vielen Bereichen der metallverarbeitenden Industrie dies als Zieltemperatur gesetzt wird.³³⁴

³³¹ Ursächlich sind die Prinzipien nach dem nullten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, wonach ein System zweier Körper mit verschiedenen Temperaturen sich nicht im Gleichgewicht befindet (0. Hauptsatz) und es eine Zustandsänderung nicht geben kann, deren einziges Ergebnis darin besteht, eine Übertragung von Wärme vom Körper mit niedrigerer Temperatur auf den Körper mit höherer zu erreichen (2. Hauptsatz). Vgl. Clausius 1864.

³³² S. Rosen und Kunjappu 2012, 184ff; Israelachvili 2011, 516ff; Alexandridis et al. 1994, 2419f.

³³³ Vgl. Schulze 2017.

³³⁴ Vgl. Haase et al. 1996, 17ff.

6 Energiebedarfsanalyse von Reinigungsanlagen im Betrieb

Die folgenden Kapitel 6 und 7 sind inhaltlich aufeinander aufbauend. Zunächst werden die theoretischen Berechnungsgrundlagen erläutert, die zur analytischen Beschreibung einer wässrigen Bauteilreinigungsanlage notwendig sind. Dies umfasst die peripheren Komponenten einer Reinigungsmaschine für einen stabilen Produktionsbetrieb. Anschließend werden die energetischen Wechselwirkungen mit der Maschinenumwelt detailliert beschrieben. Dies umfasst die Wärmetransportvorgänge der Maschine an die Umgebung. Das MVC-Schalenmodell als Ablaufübersicht für die folgenden Abhandlungen ist in Abb. 6-1 dargestellt.

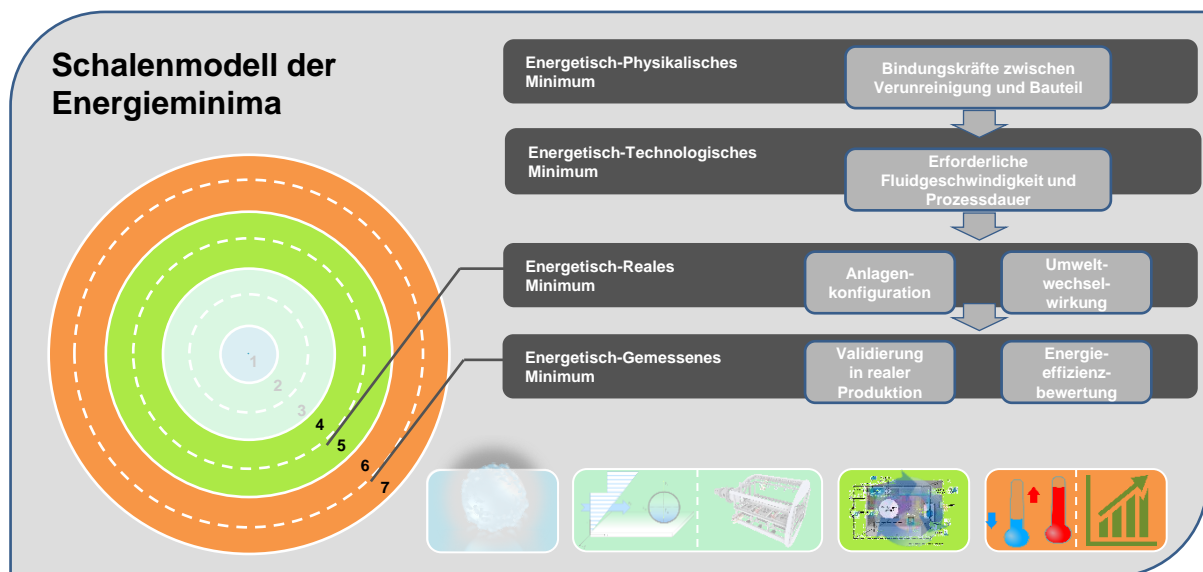


Abb. 6-1: Vorgehen zur Berechnung des energetisch-realen Minimums und Ableitung der theoretischen Berechnungsmodelle als Validierungsbasis für den gemessenen Energiebedarf³³⁵

Die Schalen sechs und sieben bezeichnen den gemessenen Energiebedarf (EBM). Die Erhebung der relevanten Messdaten und die Validierung der Energieeffizienzbewertung anhand einer Produktionskette für ein gedrehtes Bauteil erfolgt im Anschluss an die theoretischen Ausführungen.

Für einen strukturierten Ablauf zur Berechnung des ERM wird die Anlagenkonfiguration einem Modellreinigungsvorgang zugeordnet. Dabei werden die für eine stabile Produktion benötigten Verfahrensabläufe, wie Trocknung, Medienaufbereitung, Korbantriebe usw., erfasst, s. Unterkapitel 6.1. Den berechneten minimalen Energiebedarfen werden Aggregatewirkungsgrade und energetische Transportaufwände hinzugefügt, sodass sich eine Bauteilreinigungsanlage analysieren lässt. Es wird sich zeigen, dass das energetische-reale Minimum eine deutliche Differenz zum gemessenen Energiebedarf ausweist. Dies wird durch Wärmetransportvorgänge über die Hüllflächen der Reinigungsmaschine verursacht. Um diese Abläufe zu analysieren, wird eine vollständige Energiebilanz nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik durchgeführt, s. Unterkapitel 6.2.

³³⁵ Eigene Darstellung.

Zunächst muss beschrieben werden, was ein idealisierter Reinigungsvorgang darstellt. Anhand dessen kann die benötigte Energie für eine industrielle Verarbeitung analysiert und gedeutet werden. Produkte mit hoher Stückzahl bzw. geringer Taktzeit besitzen andere Voraussetzungen für eine Energiebilanz, als solche mit geringerem Durchsatz. Ebenso müssen umweltrechtliche Standards, seien es Umweltgesetz oder firmeninterne Auflagen, oder Arbeitsschutzmaßnahmen und technische Sicherheitseinrichtungen in den Reinigungsprozess implementiert werden.

6.1 Vom idealen zum realen Reinigungsvorgang

Die zuvor durchgeführten Analysen und Berechnungen zeigen einen energetischen Idealzustand, der in einer realen Produktion nicht vorhanden sein kann. Die ermittelten Energie-minima (EPM, s. Kapitel 4, und ETM, s. Kapitel 5) beziffern die optimale Basis, auf der eine Reinigungsanlage mit ihren Prozessen für eine dauerhafte Produktion operiert. Das EPM als Maß für die physikochemischen Grundzusammenhänge der Verbindungen und das ETM als technologische Beschreibung des Lösevorgangs dieser Bindungen können so als idealer Reinigungsvorgang aufgefasst werden, den folgenden Randbedingungen unterliegt:

- Die Lage, Größe, Form und Anzahl der Partikel sind genau bekannt.
- Die Eigenschaften des Bauteils (Geometrie, Material, Oberflächenbeschaffenheit und erforderliche technische Sauberkeit) sind analysiert.
- Es findet keine Resuspension statt. Das heißt, einmal entfernte Verunreinigungen haften nicht wieder auf dem Bauteil an.
- Jede energetische Wirkung auf eine Verunreinigung hat die gleichen Anfangsbedingungen, sodass
 - Energiewirkungen zum Lösen der Verunreinigung ideal zielgerichtet erfolgen und
 - Reinigungsfluide nicht aufbereitet werden müssen.
- Der Reinigungsvorgang ist nach dem Lösen der Verunreinigungen abgeschlossen.

Alle gelisteten Punkte sind in einer realen Produktionsumgebung nicht gegeben. In den folgenden Abschnitten sollen deshalb die Einflüsse einer notwendigen Bauteiltrocknung nach dem Reinigungsvorgang, der Stückzahleneinfluss und die Kreislaufführung und Aufbereitung der Reinigungsmedien in eigenen Abschnitten erläutert werden.

6.1.1 Erzeugung der benötigten Fluidvolumenströme

In Unterkapitel 5.4 wurden die Fluidgeschwindigkeiten berechnet, um bei einem Bauteil und dessen spezifischen Verunreinigungen eine geforderte technische Sauberkeit zu erreichen. Damit können die hydraulischen Leistungen berechnet werden, die zur Erzeugung einer dafür erforderlichen kinetischen Energie benötigt werden. Für die Fluidförderung werden Pumpen eingesetzt, die den besonderen Einsatzbedingungen genügen. Die verwendeten Materialien müssen die im Reinigungsmedium transportierten Feststoffpartikel und aggressiven Substanzen dauerhaft standhalten.

Für die Berechnung der erforderlichen Leistung müssen die benötigten Fluidströme bekannt sein. Dies hängt im Wesentlichen von der mit einem Reinigungszyklus zu reinigenden Teile und deren Oberflächeninhalt zusammen. Wie bereits gezeigt, ist der kinetische Energieverlust durch die Umlenkung eines Prallstrahls mit radialer Ausbreitung sehr groß, s. Abb. 5-14. Mit jedem zusätzlichen Freistrahls auf einer Fläche verringern sich die Verluste bei der Umlenkung. Gleichzeitig vergrößert sich die erforderliche hydraulische Leistung durch den zusätzlichen erforderlichen Volumenstrom. Die hydraulische Leistung P_{hy} hängt von der Druckdifferenz und Volumenstrom ab und ist proportional zur Dichte des Fluids. Die mathematische Funktion von Gleichung (6-1) zeigt den Zusammenhang.³³⁶

$$P_{hy} = \Delta p \dot{V} \quad (6-1)$$

mit

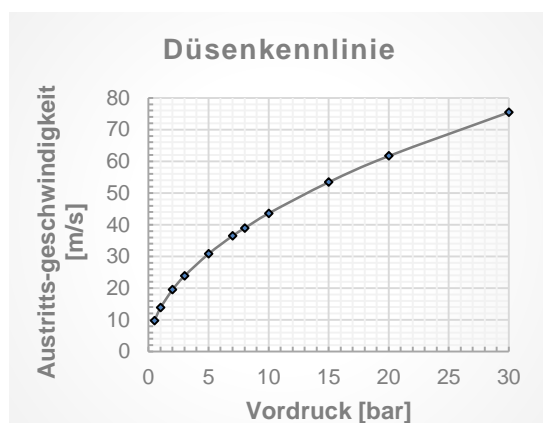
Δp : Druckdifferenz

\dot{V} : Volumenstrom durch Düse; $\dot{V} = v_F A_D = \frac{\dot{m}}{\rho_F}$

A_D : Düsenquerschnittsfläche; $A_D = \frac{\pi}{4} D_0^2$

Zur Erzeugung der kinetischen Energie werden Düsen eingesetzt. Bei optimaler Strömungsgeometrie wandeln sie potenzielle Energie in Form von Druck eines Fluids, nahezu verlustfrei, in kinetische Energie um.³³⁷ Eine Düse ist charakterisiert durch eine Verengung des Strömungsquerschnitts. Nach der Kontinuitätsgleichung wird der vorhandene Fluiddruck in eine Beschleunigung des Fluids und somit kinetische Energie umgewandelt. Es gilt nun, die erforderliche Druckdifferenz zu bestimmen, die für den umgelenkten Freistrahls auf dem Bauteil benötigt wird.

Die Düsenkennlinie, die den Zusammenhang der Austrittsgeschwindigkeit über den Druck, der vor dem Düsen Eintritt anliegt, wiedergibt, ist in Abb. 6-2 dargestellt.³³⁸



$$v_{F2} = v_{F1} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{1/2} \quad (6-2)$$

mit

p_i : Jeweiliger Vordruck am Düsen Eintritt

Die dargestellte Kennlinie ist beispielhaft für eine Vollstrahldüse mit $D_0 = 1,65 \text{ mm}$ berechnet

Abb. 6-2: Düsenkennlinie einer Vollstrahldüse mit einem Durchmesser der Düsenöffnung von $D_0 = 1,65 \text{ mm}$ ³³⁹

³³⁶ Im Bereich der Pumpentechnik wird in der Regel mit der Förderhöhe die hydraulische Leistung berechnet. Förderhöhe und Druckdifferenz sind direkt proportional zu einander über die Dichte und Fallbeschleunigung $H = \Delta p / \rho g$, s. Gülich 2010, S. 46.

³³⁷ Für günstige Eintrittswinkel der Strömung in die Düse gibt VDI e.V. 2013, S. 1229 Verluste von 4 % an, die sich bei glatten Oberflächen und großen Reynolds-Zahlen sogar noch deutlich verringern lassen.

³³⁸ Die Düsenkennlinie kann im technischen Datenblatt des Herstellers recherchiert werden.

³³⁹ Eigene Darstellung.

Aus den Geschwindigkeiten in (6-2) kann über die Düsengeometrie (bei einer Vollstrahldüse ist von einer Kreisöffnung auszugehen) der benötigte Differenzdruck $\Delta p_{Dü}$ berechnet werden, s. Gleichung (6-3).³⁴⁰

$$\Delta p_{Dü} = v_F^2 c_V^2 \frac{\rho}{2} \quad (6-3)$$

mit

c_V : Durchflusskoeffizient; $c_v \approx 1$

$\Delta p_{Dü}$ Druckdifferenz aus Düsenvordruck und Umgebungsdruck

Aus der Zusammenführung von (6-3) in (6-1) ergibt sich Gleichung (6-4).

$$P_{hy} = n_D v_F^3 c_V^2 \rho_F \frac{\pi D_0^2}{8} \quad (6-4)$$

mit

n_D : Anzahl der Düsen; $n_D = 1; 2; 3; \dots$

In der Berechnung zur erforderlichen hydraulischen Gesamtleistung ist der Zählparameter n_D enthalten. Dieser erhöht je nach Anzahl der zu reinigenden Oberfläche den Volumenstrom, der mit der Geschwindigkeit v_F für jede Düse erzeugt muss.

Über die Dauer der Förderung lässt sich das energetisch-reale Minimum $E_{hy ges}$ der hydrodynamischen Reinigung berechnen. Es ist gegeben durch die zeitlichen Integration der Leistung, s. Gleichung (6-5).³⁴¹

$$E_{hy ges} = \int P_{hy}(t) dt \quad (6-5)$$

$$E_{hy ges} = P_{hy} \phi \Delta t$$

mit

$P_{hy \phi}$: Durchschnittliche hydrodynamische Leistung

In Gleichung (6-5) kann mit der durchschnittlichen hydrodynamischen Leistung gerechnet werden. Hierbei ist vereinfachend die Einschaltdauer der Pumpe zur Berechnung der erforderlichen hydrodynamischen Energie maßgebend.³⁴²

6.1.2 Erzeugung der benötigten Temperaturen

Die Berücksichtigung einer erforderlichen Reinigungstemperatur kann in die Berechnung des ERM einfließen. Die in die Bilanz eingehenden Variablen sind dabei die Temperaturdifferenz zwischen Reinigungs- und Umgebungstemperatur und die Volumina der involvierten Reinigungsmedien bzw. deren Vorhaltetanks. Des Weiteren muss die Bauteilmasse berücksichtigt werden, falls diese eine vom Reinigungsmedium verschiedene Temperatur besitzt.

³⁴⁰ Vgl. Idelčik und Ginevskii 2007, 223ff.

³⁴¹ Vgl. Hering et al. 2016, S. 258.

³⁴² Dies kann für den Fall angenommen werden, dass die dynamischen Lastanteile der Fluidförderung klein sind gegenüber den konstanten.

Der Energieinhalt des Tanks kann berechnet werden über die thermodynamische Definition der inneren Energie bei konstantem Druck und Volumen durch Gleichung (6-6).³⁴³

$$E_{therm} = dU = m_F c d\vartheta \quad (6-6)$$

mit

m_F : Masse des Fluids im Tank; $m_F = \rho_F V$

c : Spezifische Wärmekapazität des Fluids³⁴⁴

$d\vartheta$: Temperaturdifferenz zwischen der Fluidtemperatur und dem Bezugsniveau, zu meist der Umgebungstemperatur

Das Tankvolumen hängt von der zu reinigenden Stückzahl pro Zeiteinheit und er dem Verschmutzungsgrad der Bauteile ab.³⁴⁵

6.1.3 Trocknungseinfluss

Der wässrigen Bauteilreinigung obliegt im Gegensatz zur Lösemittelreinigung der Nachteil, ein korrosionsfördernder Elektrolyt zu sein und damit Werkstoffe ohne Korrosionsschutz zu schädigen. Durch einen Wartezeit reduzierten Produktionsablauf müssen zumeist auch Produktionsanlagen, wie Wärmebehandlungsöfen, mit komplett trockenen Bauteilen bestückt werden. In der Regel besitzen alle wässrigen Reinigungsanlagen Trocknungsfunktionseinheiten, die direkt nach der Reinigung die Aufgabe haben, Wasserrückstände zu entfernen. Die wesentliche Variable des Energiebedarfs zur Trocknung ist die auf den Bauteilen nach der Reinigung zurückbleibende Masse an Wasser. In der Literatur sind Werte aus der Praxis zu finden, die von einer Beladung von 50 - 100 ml/m² Wasserrückstände ausgehen.³⁴⁶ Darüber hinaus ist ebenso die Technologie entscheidend, die eingesetzt wird, um das Wasser zu entfernen. Die am häufigsten zum Einsatz kommenden Techniken sind in Abb. 6-3 dargestellt.

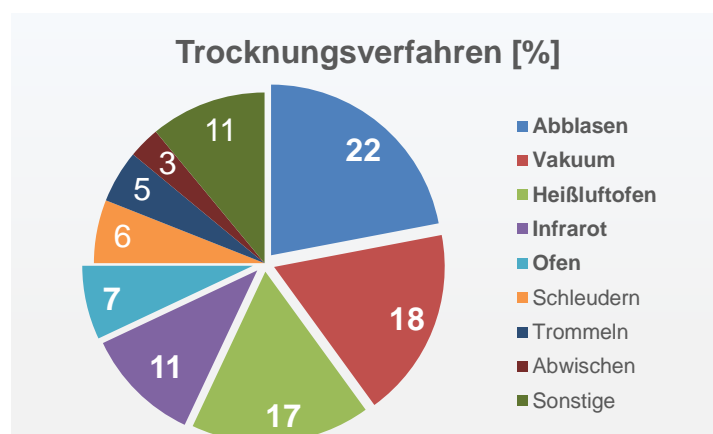


Abb. 6-3: Am häufigsten eingesetzte Trocknungsverfahren³⁴⁷

³⁴³ Vgl. Hering et al. 2016, S. 175.

³⁴⁴ Eigentlich handelt es sich um die spezifische isobare Wärmekapazität c_p . Da die Temperatur jedoch im Bereich < 100 °C liegt, kann $c \cong c_p$ definiert werden.

³⁴⁵ S. Wullstein 2004, S. 83.

³⁴⁶ Die Angabe gilt für eine vertikale Fläche des Bauteils, s. Grün 2016, 1173 Im Falle von schöpfenden Bauteilen kann die Masse an Wasser um einige Größenordnungen darüber liegen.

³⁴⁷ Eigene Darstellung. Vgl. Bilz et al. 2013, S. 26.

Aus Abb. 6-3 wird deutlich, dass etwa drei Viertel aller Anwender ein Trocknungsverfahren einsetzen, bei dem die Entfernung von Wasser auf dem Prinzip der Verdunstung in Luft basiert. Die dafür benötigte Energie E_{trock} setzt sich aus der zu bewegenden Trocknungsluft und möglicher zusätzlicher Hilfsenergie, wie Wärme oder Unterdruck zusammen, um die Trocknungszeit zu verkürzen oder die maximal mögliche Masse Wasser zu erhöhen.

Die Verdunstung von Wasser stellt durch die vorliegenden Stoffgemische und thermodynamischer Abhängigkeiten einen komplexen Vorgang dar. Phänomenologisch wird darauf in einem späteren Kapitel genauer eingegangen, s. Abschnitt 6.2.2. An dieser Stelle soll es zunächst genügen, dass zur Bewegung eines Luftmassenstroms eine Antriebsleistung eines entsprechenden Aggregats, wie Verdichter oder Gebläse, über die Dauer des Trocknungsvorgangs erforderlich ist. Für eine Beschleunigung des Trocknungsvorgangs ist die bereits erwähnte Hilfsenergie hinzu zu rechnen, s. Gleichung (6-7).

$$E_{trock} = \left(\frac{\dot{m}_L}{\rho_L} \Delta p_{ver} + dQ_{zu} \right) \quad (6-7)$$

mit

\dot{m}_L : Luftmassenstrom des Verdichters

Δp_{ver} : Druckdifferenz des Verdichters

dQ_{zu} : Zugeführte Hilfsenergie; hier in Form von Wärme

Der in Gleichung (6-7) benötigte Luftmassenstrom hängt von dem Massenstrom des Wassers ab, das von der Bauteiloberfläche entfernt werden soll. Über die Definition der absoluten Luftfeuchte, s. Abschnitt 6.2.2, lässt sich Luftmassenstrom berechnen.

6.1.4 Aufbereitung der Reinigungsmedien

Die Energie zum Aufbereiten der Reinigungsmedien berechnet sich nach dem gleichen Prinzip, wie die Ermittlung der hydraulischen Leistung der Fluidförderung. Die Aufbereitung der Reinigungsmedien erfolgt durch das Trennen der demulgierten Verunreinigungen, die sich aufgrund von Dichteunterschieden an der Spiegeloberfläche der Reinigungsmedien im Medientank sammeln.³⁴⁸ Die demulgierte Phase kann abgepumpt und über entsprechende Trennanlagen, wie Osmosefiltration oder (Koaleszenz-) Abscheider geführt werden. Die dafür benötigte Energie $P_{hy treat}$ ist für die Pumpleistung aufzuwenden und richtet sich nach dem Volumenstrom und der von der Pumpe erzeugten Druckdifferenz bzw. Förderhöhe und berechnet sich über den in Gleichung (6-8) benannten Zusammenhang.

$$P_{hy treat} = \Delta p_{treat} \dot{V}_{treat} \quad (6-8)$$

mit

Δp_{treat} : Druckdifferenz der Förderpumpe zur Badaufbereitung

\dot{V}_{treat} : Volumenstrom der Förderpumpe zur Badaufbereitung

³⁴⁸ Vgl. Grün 2016, 1175.

Zur Berechnung des Energiebedarfs gilt äquivalent die in Gleichung (6-5) definierte Funktion für die Integration der zeitlich variablen Leistungsaufnahme. In der Regel wird diese konstant über die Zeit sein, sodass mit der Leistungsaufnahme im Betriebspunkt über die Einschaltdauer gerechnet werden kann.

6.1.5 Energiebilanzierung eines realen Reinigungsvorgangs

In den vier zuvor diskutierten Abschnitten 6.1.1 - 6.1.4 wurden die Energietерme eingeführt, um das energetisch-reale Minimum ERM eines Prozesses einer wässrigen Reinigung zu ermitteln. Die Summe der Energietерme stellt gleichzeitig das ERM dar, wie es in Abschnitt 3.3.3 beschrieben und durch Gleichung (3-6) definiert wurde.

Das energetisch-reale Minimum kann somit durch Einsetzen der Gleichungen (6-5) - (6-8) in (3-6) berechnet werden. Durch die Wirkungsgrade der Aggregate können die Wandlungsverlustterme $E_{e\ i}$ ermittelt werden. Da die Pumpen nicht verlustfrei arbeiten, müssen zwei wesentliche Wirkungsgrade der hydraulischen Leistung hinzugerechnet werden, um die erforderliche hydraulische Leistung zu erreichen. Dies sind der hydraulische Wirkungsgrad und der elektrische Wirkungsgrad des Motors. Beide Wirkungsgrade sind in der Regel im Datenblatt des Pumpenherstellers zu finden. Werden die Pumpen nahe ihres optimalen Betriebspunktes genutzt, sind hydraulische Wirkungsgrade von 75 % für mehrstufige Radialkreiselpumpen Stand der Technik.³⁴⁹ Der Motorwirkungsgrad nach IE3-Standard ergibt sich zu ca. 90-92 %.³⁵⁰ Mit diesen Aufschlägen kann die Leistung zur Fluidförderung abschließend berechnet werden. Vollständig ergibt sich das ERM somit zu Gleichung (6-9).

$$\begin{aligned}
 ERM = & E_{hy\ ges} \left(1 + \frac{1}{1 - \eta_{pump}} \right) + E_{therm} \left(1 + \frac{1}{1 - \eta_{therm}} \right) \\
 & + E_{trock} \left(1 + \frac{1}{1 - \eta_{trock}} \right) + E_{treat} \left(1 + \frac{1}{1 - \eta_{treat}} \right) \\
 & + \sum_{i=1}^n E_{zusatz\ i} \left(1 + \frac{1}{1 - \eta_{zusatz\ i}} \right)
 \end{aligned} \tag{6-9}$$

mit

η_{pump} : Wirkungsgrad der Pumpe für die Fluidförderung; $\eta_{pump} = \eta_{hy}\eta_M$

η_{hy} : Hydraulischer Pumpenwirkungsgrad

η_M : Pumpenmotorwirkungsgrad

η_{therm} : Wirkungsgrad der thermischen Wärmezufuhr; bei elektrischer Heizung gilt $\eta_{therm} \cong 1$

η_{trock} : Wirkungsgrad des Verdichters für die Luftförderung

η_{treat} : Wirkungsgrad der Pumpe für die Medienaufbereitung

$E_{zusatz\ i}$: Weitere Energietерme installierter Peripherie mit den entsprechenden Wirkungsgraden $\eta_{zusatz\ i}$ ³⁵¹

³⁴⁹ S. Gülich 2010, S. 49.

³⁵⁰ S. Doppelbauer 2011, 168ff.

³⁵¹ Hierzu zählen Aggregate der Werkstückrotation, Ultraschallanlagen, automatische Reinigungskemiedosierung u.v.m, die sich zumeist von Anlagen zu Anlage unterscheiden.

Der in Gleichung (6-9) verwendete Ausdruck $E_{\text{zusatz } i}$ steht für weitere Aggregate i , die je nach Anlagenkonfiguration an dem Reinigungsprozess beteiligt sein können. Eine generalisierte Aussage, ob diese Aggregate einen wesentlichen Einfluss auf das ERM besitzen kann nicht getroffen werden. Zu variantenreich sind die möglichen Reinigungsverfahren und damit Anlagenkonfigurationen. Bei der Ermittlung des ERM muss somit in die Analyse der Maschinenkonfiguration besondere Sorgfalt gelegt werden. Eine Methode dazu wird in Abschnitt 6.3.1 (Verbrauchs- und Nutzungsgruppen orientierte Maschinenstrukturanalyse) gegeben und erläutert.

6.2 Energiebilanzierung nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik

Die Berechnung des ERM zeigt bereits eine tiefgehende Analyse, welcher Energieeinsatz für einen Reinigungsvorgang benötigt wird. Es wird sich immer eine größere Differenz zum gemessenen Energiebedarf EBM einer realen Reinigungsmaschine ergeben. Dies ist vor allem durch Energietransporte und Energiewandlungen innerhalb der Maschine und über die Systemgrenzen hinaus begründet. In diesem Kapitel soll nun eine Analyse erfolgen, mit der die einzelnen Energieflüsse bilanziert werden können und damit die Differenz von ERM zu EBM ermittelt werden kann.

Die Bilanzierung nach dem 1. Hauptsatz (HS) der Thermodynamik für ein Fertigungsverfahren respektive dafür verwendete Produktionsanlagen ermöglicht eine Analyse der energetischen Abläufe. Für die Zielstellung, eine detailreiche Energiewandlungskette und damit die Informationen über die energetischen Bedarfsminima zu erhalten, ist es wesentlich, die Einzelabläufe und Wirkmechanismen aufzuzeigen.

Der erste Hauptsatz folgt dem Prinzip der Energieerhaltung und beschreibt die Energieänderung eines Systems durch die Betragsänderungen und Wandlungen der Energieformen Wärme, technischer Arbeit und die Änderung der an Masse gebundenen Energie. Diese können immer nur über die Grenzen eines Bilanzraumes erfolgen.³⁵²

Für das System der Bauteilreinigung ist es zielführend, die Energiebilanz zunächst für die geometrische Hüllform der Reinigungsmaschine zu bilden. Die Orientierung an der Geometrie der entsprechenden Reinigungsanlage ermöglicht die einfachste Möglichkeit zur Festlegung und Erfassung der Zustandsgrößen der Energiebilanz. Die Darstellung des Bilanzraums ist in Abb. 6-4 gegeben.

³⁵² Vgl. Stephan et al. 2013, S. 81.

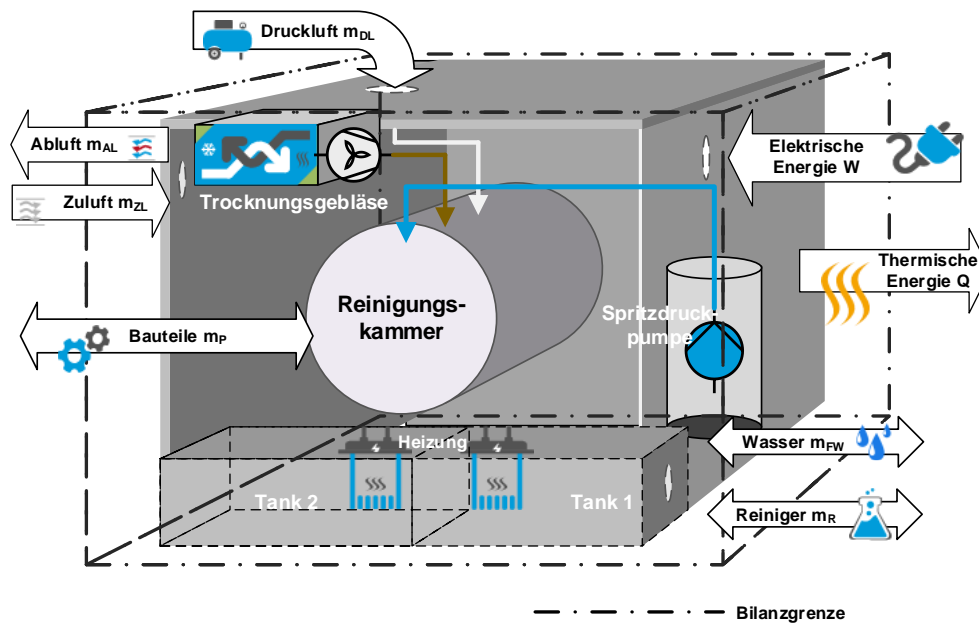


Abb. 6-4: Prinzipskizze einer Reinigungsmaschine mit den energetisch-relevanten Stoff- und Energieflüssen³⁵³

Um sich der qualitativen und quantitativen Bestimmung der Energieflüsse bei einem Reinigungsvorgang zu analytisch zu nähern, ist die Betrachtung der Reinigungsanlage als offenes System wesentlich. Hierbei müssen die Luftmassenströme und Wärmetransportvorgänge, die sich über die Systemgrenze der Reinigungsmaschine hinweg stattfinden, erfasst und bilanziert werden.

Entsprechend des 1. HS der Thermodynamik kann für ein beliebiges System dessen Energieänderung dE beschrieben werden mit Gleichung (6-10).³⁵⁴

$$dE = dW + dQ + E_M \quad (6-10)$$

mit

W : Arbeit

Q : Wärme

E_M : An Masse gebundene Energie, $E_M = \sum dm \left(h + \frac{w^2}{2} + gz \right)$

h : Spezifische Enthalpie; $h = u + pv$

u : Spezifische innere Energie

p : Systemdruck

v : Spezifisches Volumen des Systems

w : Geschwindigkeit des Systems

z : Niveaukoordinate des Systems

In diesem Fall in differentieller Form dargestellt, gibt die Gleichung das Prinzip der Erhaltung der Energien wieder. Eine Änderung der Systemenergie kann somit nur durch eine entsprechende summierte Änderung aus Arbeit, Wärme und Massentransport hervorgerufen

³⁵³ Darüber hinaus sind noch Stoffflüsse bekannt, die aber für Bilanzierung zu vernachlässigen sind – Verunreinigungen aus Filteranlage (Größenordnung kg/a)

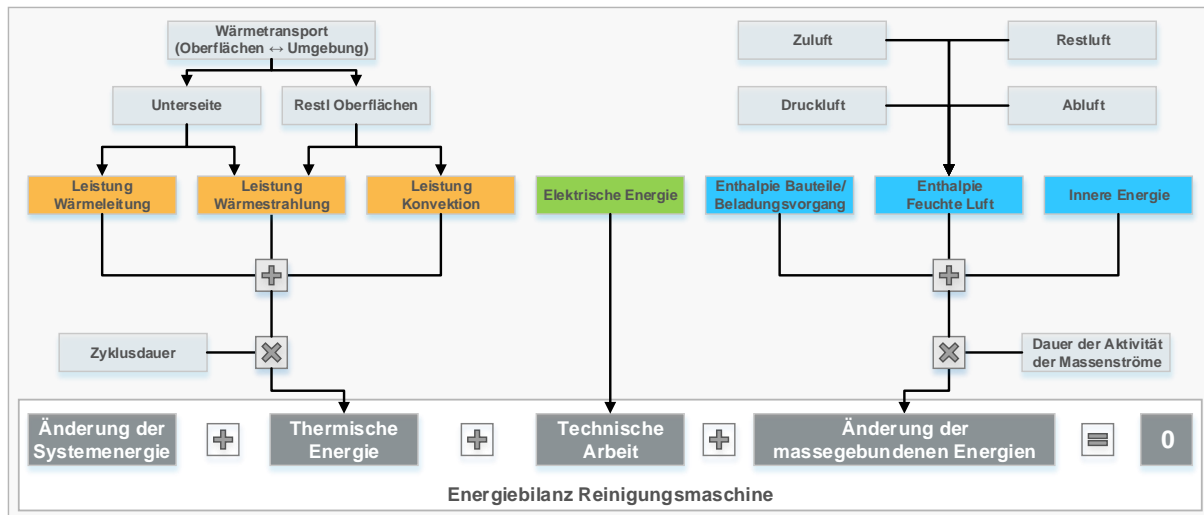
³⁵⁴ Vgl. VDI e.V. 2013, S. 19.

werden. Diese Bilanzgleichung wird nun auf das oben definierte System mit seinen Bilanzgrenzen angewendet. Dazu müssen alle Stoff- und Energieflüsse der Maschine erfasst werden, die in die Bilanzgrenze ein- und austreten. Hierbei können die Energieflüsse in Form von Wärme ($Q = f(T)$), Arbeit ($W = f(T)$) und der an Masse gebundenen Energie ($E_M = f(u, w, z)$)³⁵⁵ am einfachsten empirisch bestimmt werden. Wie Abb. 6-4 zeigt, sind das bei einer Reinigungsmaschine

- Bauteile,
- Zuluft, Abluft und Druckluft,
- Wasser,
- Reinigungschemie,
- Elektrische Energie und
- Thermische Energie.

Als Bauteile wird hierbei die Masse an Bauteilen m_p bezeichnet, die über den Betrachtungszeitraum in die Maschine geladen und entnommen wird. Dies umfasst die Gesamtmasse an Bauteilen, Werkstückträger und Verunreinigungen, die zyklisch in die Reinigungsmaschine ein- und austreten. Die Luftströme benennen Stoffgemische aus den Luftgasen und gasförmigem Wasser in unterschiedlichen Konzentrationen und thermodynamischen Zuständen m_{AL} , m_{ZL} , m_{DL} . Wasser m_{FW} und Reiniger m_R bilden als Gemisch das Reinigungsmedium, das in der Maschine im Kreislauf von den Tanks zur Reinigungskammer und zurückgeführt wird. Masseverluste an Wasser bilden sich durch anhaftendes Restwasser an den Bauteilen und Werkstückträgern und der feuchten Abluft. Die Bestandteile des Reinigers werden durch die eingetragenen Verunreinigungen mit der Verfahrensdauer gelöst und zu Sammelbehältern transportiert. Abhängig von der Masse an Verunreinigungen müssen die Reiniger nachdosiert werden. Alle sechs genannten Stoffströme bilden thermodynamisch betrachtet, die an Masse gebundene Energie E_M . Die elektrische Energie wird an alle Geräte und Komponenten innerhalb der Reinigungsmaschine verteilt. Sie geht als zugeführte Energie in die Bilanz ein und stellt die Arbeit W dar. Die Wärme fasst die drei Wärmetransportvorgänge Strahlung, Leitung und Konvektion zusammen, die von der Maschine über die Systemgrenze abgeführt werden. Sie wird in der Gleichung (6-10) mit Q repräsentiert. Der Ablauf zur vollständigen Bilanzierung nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ist in Abb. 6-5 dargestellt.

³⁵⁵ Die Kleinbuchstaben kennzeichnen die spezifischen, das heißt, auf die Masse bezogenen Größen.

Abb. 6-5: Ablauf der Energiebilanzierung nach dem ersten Hauptsatz³⁵⁶

Wie in Abb. 6-5 ersichtlich, setzen sich die einzelnen Energieformen Wärme, Arbeit und an Masse gebundene Energie aus einzelnen Termen zusammen:

- die grundlegenden Mechanismen des Wärmetransports,
- der Umwandlung von elektrischer Energie in mechanischer Bewegungsarbeit und
- der Enthalpieströme der Luftmasse und Bauteile.

Durch die vollständige Erfassung der ein- und austretenden Energieflüsse über die Bilanzgrenze wird eine Änderung der Systemenergie als null definiert ($dE := 0$). Dies setzt voraus, dass sich das System in einem stationären Zustand befindet. Dies muss bei der Ermittlung benötigter Messgrößen für die Bilanzierung berücksichtigt werden.

Der Term der technischen Arbeit in Gleichung (6-10) wird durch die Messung der elektrischen Energie erfasst. Durch verfügbare Messtechnik stellt dies keine Schwierigkeit dar und ist direkt in der beispielhaften Validierungsrechnung für Reinigungszyklus in Abb. 7-8 angegeben. Dagegen stellen die zwei weiteren Energietерme, die Wärmetransportvorgänge und die Änderung der Masse gebundene Energien (Innere Energie, Enthalpieströme der Luft- und Wassermassen und die Enthalpieströme der Bauteile), ein erhebliches Wissen des Analysten voraus. Die Untersuchungen wie die einzelnen Energieänderung erfasst und berechnet werden können, folgen in den nächsten beiden Abschnitten.

6.2.1 Wärmetransport

Der Wärmetransport innerhalb der Maschine und über die Bilanzgrenze geschieht über drei grundlegende Mechanismen:³⁵⁷

1. *Wärmeleitung* beschreibt den Energietransport in ruhenden Festkörpern, Flüssigkeiten oder Gasen über den Impulsaustausch benachbarter Atome oder Moleküle, angeregt durch die schwingende, brownsche Molekularbewegung.

³⁵⁶ Eigene Darstellung.

³⁵⁷ Vgl. Stephan et al. 2013, 399f.

2. *Konvektion* beschreibt die Mitführung von Energie durch Atome oder kleinere Molekülverbände in einer gerichteten Bewegung.
3. *Wärmestrahlung* beschreibt den Energietransport ohne materiellen Bezug allein aufgrund der Emission von elektromagnetischen Wellen.

Wärmeleitung

Die ortsfeste Wärmeleitung kann allein an den Kontaktflächen der Reinigungsmaschine mit dem Boden entstehen. In allen anderen Punkten findet eine Bewegung der Umgebungsluft statt, sodass der Wärmetransport nur durch Konvektion und Strahlung beschrieben werden kann. Formal definiert ist der Wärmestrom durch Wärmeleitung \dot{Q}_{WL} über die Gleichung (6-11). Es wird auch Fouriersches³⁵⁸ Gesetz genannt.³⁵⁹

$$\dot{Q}_{WL} = \alpha \cdot A \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) \quad (6-11)$$

mit

α : Wärmeübergangskoeffizient; $\alpha = \frac{\lambda}{s}$

λ : Wärmeleitfähigkeit

s : Wanddicke

A : Bezugsfläche

ϑ_i : Temperaturen an den Wandflächen

Die Bezugsgrößen der Geometrie und die Lage der Temperaturen können der Abb. 6-6 entnommen werden. Das Schema zeigt am Beispiel einer Reinigungsmaschine, wo der Wärmetransport durch Wärmeleitung stattfindet. Die Wärmeleitfähigkeit des Materials entspricht in diesem Fall dem der Aufstellfüße.

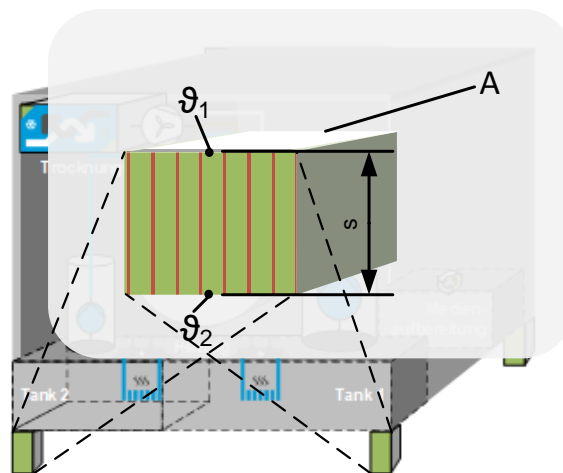


Abb. 6-6: Schematische Darstellung der Energietransporte durch Wärmeleitung an einer Reinigungsmaschine³⁶⁰

³⁵⁸ Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830) war ein französischer Mathematiker und Physiker. Durch die Herleitung einer Lösung durch Randwertberechnungen der partiellen Differentialgleichung entwickelte Fourier die nach ihm benannte Fourier-Reihe.

³⁵⁹ Das Gesetz in Gleichung (6-11) gilt für die stationäre Wärmeleitung im ebenen Fall. Fourier selbst entwickelte für den instationären dreidimensionalen Fall die allgemeine Form der Wärmestromdichte $\vec{q} = -\lambda \text{ grad } \vartheta$.

³⁶⁰ Eigene Darstellung.

Zur Berechnung der Energietransporte durch Wärmeleitung sind die Temperaturen $\vartheta_{1,2}$, die Auflage- bzw. Kontaktflächen der Maschine mit dem Boden A, die Fußhöhe s und die Wärmeleitfähigkeit für den Werkstoff der Aufstellfüße zu ermitteln.³⁶¹

Konvektion

Der Wärmetransport in strömenden Fluiden lässt sich mit dem Modell der Konvektion analysieren. Abb. 6-7 gibt schematisch den Sachverhalt wieder.

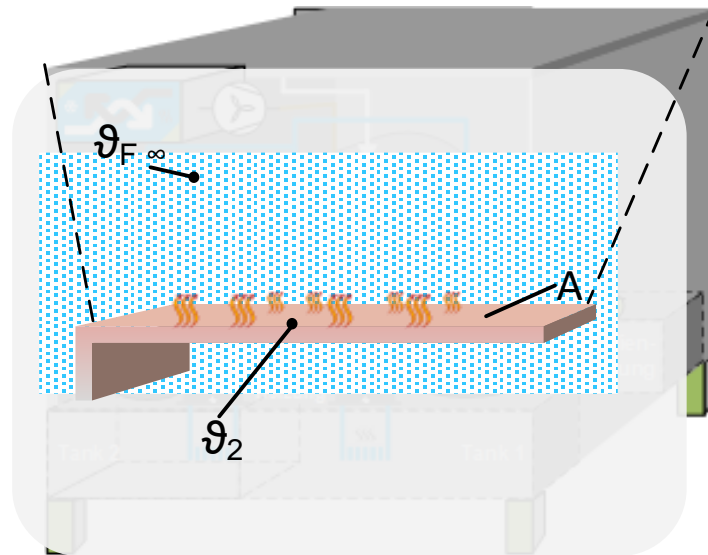


Abb. 6-7: Schematische Darstellung des konvektiven Wärmetransports an der Maschinenoberseite³⁶²

Die ebene Fläche der Maschinenoberseite mit der Temperatur ϑ_W und die Umgebungsluft mit der ungestörten Temperatur $\vartheta_{F\infty}$ berühren sich an der Fläche A. Der durch Konvektion hervorgerufene Wärmetransport \dot{Q}_K lässt über den mathematischen Zusammenhang in Gleichung (6-12) beschreiben.³⁶³

$$\dot{Q}_K = \alpha_{konv} \cdot A \cdot (\vartheta_W - \vartheta_{F\infty}) \quad (6-12)$$

mit

α_{konv} : Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

A: Bezugsfläche

ϑ_W : Temperatur an der Wandfläche

$\vartheta_{F\infty}$: Ungestörte Fluidtemperatur

Es werden zwei Arten von Konvektion unterschieden: freie und erzwungene. Bei der freien Konvektion erzeugt die Erwärmung einen Temperaturgradienten des Fluids in Richtung des

³⁶¹ Eine Übersicht des Berechnungsplans findet sich im Anhang D.2.1.

³⁶² Eigene Darstellung.

³⁶³ Vgl. Stephan et al. 2013, S. 415.

Normalenvektors der Oberfläche. Durch die unterschiedlichen Temperaturen entstehen Dichteunterschiede im Fluid selbst. Nach dem archimedischen³⁶⁴ Prinzip werden die Volumenelemente mit höherer Temperatur dadurch in eine Auftriebsbewegung erzeugt. Bei der erzwungenen Konvektion hingegen wird das Fluid durch entsprechende Arbeitsmaschinen beschleunigt über die Oberfläche gezwungen. Beide Formen der Konvektion können auch gleichzeitig auftreten.

Im Wesentlichen beruht der konvektive Wärmetransport auf einer Temperaturdifferenz der festen Oberfläche und des darauf strömenden Fluids. Der Koeffizient α_{konv} ist eine Funktion der Stoffeigenschaften des Fluids, des Strömungszustandes und der geometrischen Verhältnisse:

$$\alpha_{konv} = f(\lambda, \eta, \rho, c_p, \vartheta_F, \vartheta_W, v_F, \text{Geom.}) \quad (6-13)$$

Da die Funktion in der Regel nicht analytisch zu lösen ist, werden, ähnlich der in Kapitel 5 beschriebenen, dimensionslose Kennzahlen herangezogen, um eine empirisch überprüfbare Theorie von ähnlichkeitsbezogenen Ansätzen zu erhalten.³⁶⁵ Die wesentlichen Kennzahlen zur Beschreibung des konvektiven Wärmetransports sind dabei die Nußelt³⁶⁶-Zahl, Prandtl³⁶⁷-Zahl und Grashof³⁶⁸-Zahl. Sie sind definiert durch die folgenden mathematischen Formalismen, Gleichung (6-14).

$$Nu = \alpha_{konv} \cdot \frac{L}{\lambda_F} \leftrightarrow Nu = f(Pr, Gr, \text{Geometrie})$$

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{v \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda_F} \quad (6-14)$$

$$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot (\vartheta_W - \vartheta_F)}{v^2}$$

mit

Nu : Nußelt-Zahl

Pr : Prandtl-Zahl

Gr : Grashof-Zahl

L : Charakteristische Länge

λ_F : Wärmeleitfähigkeit des Fluids

c_p : Spezifische Wärmekapazität

β : Wärmeausdehnungskoeffizient

³⁶⁴ Archimedes von Syrakus (287 v. Chr.-212 v. Chr.) war ein griechischer Philosoph.

³⁶⁵ S. Stephan et al. 2013, S. 415.

³⁶⁶ Wilhelm Nußelt (1882–1957) war ein deutscher Ingenieur, die dimensionslosen Kennzahlen zur Beschreibung der Wärmetransportphänomene einführte.

³⁶⁷ S. Fußnote 160.

³⁶⁸ Franz Grashof (1826–1893) war ein deutscher Ingenieur und unter anderem der Gründer des Vereins Deutscher Ingenieure e.V. (VDI).

Die Nußelt-Zahl gibt dabei die Verhältnisse des Wärmeübergangs vom Festkörper auf das Fluid wieder und ist die charakteristische Kennzahl des stationären, konvektiven Wärmeübergangs³⁶⁹. Sie reduziert die benötigten Größen zur Analyse des Wärmetransports. Die Prandtl-Zahl ist eine Stoffkenngröße und kennzeichnet die Wärmeübertragungseigenschaften des Fluids.³⁷⁰ Wie die Reynolds-Zahl, s. Gleichung (5-10), und die Grashof-Zahl ist sie eine universelle Kennzahl. Die Grashof-Zahl charakterisiert das Verhältnis von Auftriebs- zu Reibungskräften.³⁷¹ Im Fall der erzwungenen Konvektion wird die Grashof-Zahl im Ausdruck der Nußelt-Zahl durch die Reynolds-Zahl ersetzt, die als Pendant die Eigenschaften einer aufgeprägten Strömung des Fluids berücksichtigt.³⁷²

Die Bestimmung der dimensionslosen Kenngrößen ist abhängig von einigen grundlegenden temperaturabhängigen Stoffeigenschaften, wie Viskosität oder Dichte. Als Bezugstemperatur wird in der Literatur eine mittlere Temperatur aus Wand- und Umgebungstemperatur angegeben.³⁷³ Wie Untersuchungen bei einer Werkzeugmaschine gezeigt haben, ist die Nutzung konstanter Fluideigenschaften für Strömungen mit einer Temperatur < 50° C eine ausreichende gute Näherung zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten.³⁷⁴

Für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs stehen umfangreiche Formeltabellen zur Verfügung, die eine Vielzahl von analytischen Lösungen zur Berechnung der Nußelt-Zahlen bereitstellen.³⁷⁵ Mit dem Wärmekoeffizienten sind nun alle Größen zur Ermittlung des Wärmestroms durch Konvektion bekannt.³⁷⁶

Wärmestrahlung

Jeder Körper mit einer Temperatur $\vartheta > 0 \text{ K}$ gibt Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung an seine Umgebung ab. Diese Energie wird als Wärmestrahlung bezeichnet.³⁷⁷ Die abgegebene Wärmestrahlung eines idealen schwarzen Strahlungskörpers³⁷⁸ berechnet sich nach dem Stefan³⁷⁹-Boltzmann³⁸⁰-Gesetz mittels Gleichung (6-15).

$$\dot{e} = \dot{q} = \sigma \vartheta^4 \quad (6-15)$$

mit

\dot{e} : Energiestromdichte

\dot{q} : Wärmestromdichte

³⁶⁹ Vgl. Hering et al. 2016, S. 228.

³⁷⁰ Vgl. Stephan et al. 2013, S. 418–419; Hering et al. 2012, S. 228.

³⁷¹ Vgl. Stephan et al. 2013, S. 418.

³⁷² S. VDI e.V. 2013, S. 22.

³⁷³ S. Fußnote 372.

³⁷⁴ Gleich 2008, S. 22 zeigt in seiner Arbeit für einen Modellierungsfall (Luft als Umgebungsmedium mit einer Temperatur von 20 °C und Temperaturdifferenzen von weniger als 40 K), dass die Wärmeübergangskoeffizienten eine max. Abweichung von ca. 5 % aufweisen.

³⁷⁵ S. VDI e.V. 2013, 27ff.

³⁷⁶ Eine Übersicht zum Ablauf der Berechnung findet sich in D.2.3.

³⁷⁷ Vgl. Stephan et al. 2013, 456f.

³⁷⁸ Ein idealer strahlender Körper wird auch schwarzer Strahler bezeichnet. Wesentliche Eigenschaften dieses Gedankenmodells sind die vollständige Absorptions- und Emissionsfähigkeit mit gleicher Intensität über das gesamte Wellenspektrum.

³⁷⁹ Josef Stefan (1835–1983) war ein österreichischer Physiker und Mathematiker.

³⁸⁰ Ludwig Boltzmann (1844–1906) war ebenfalls ein österreichischer Physiker und Mathematiker und leitete die experimentellen Ergebnisse seines Professors Josef Stefan, s. Fußnote 266, theoretisch her.

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante

ϑ : Temperatur des Strahlungskörpers

Die Strahlungsleistung hängt somit nur von der Temperatur und des Proportionalitätsfaktor σ ab. Reale Strahlungskörper weisen gegenüber einem schwarzen Strahler ein anderes Emissionsverhalten auf, dass durch die Emissionszahl ε ausgedrückt wird, s. Gleichung (6-16).

$$\varepsilon = \frac{\dot{e}}{\dot{e}_S} \quad (6-16)$$

mit

\dot{e}_S : Energiestromdichte eines schwarzen Strahlers bei gleicher Temperatur

Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass ein Körper niemals nur Strahlung emittiert sondern gleichzeitig auch absorbiert. Ein realer Körper befindet sich somit immer im Strahlungsaustausch.³⁸¹ Der resultierende Wärmestrom \dot{Q}_{S12} eines Körpers hängt damit von seinen mit der Umgebung in Beziehung stehenden Flächen, dem Emissionsgrad als Ausdruck der Oberflächenstruktur und der Temperatur ab. Dies führt zum formalen Ausdruck in Gleichung (6-17).³⁸²

$$\dot{Q}_{S12} = \frac{\sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)\varphi_{12}\varphi_{21}} A_1 \varphi_{12} (\vartheta_1^4 - \vartheta_2^4) \quad (6-17)$$

mit

Index 1 bedeutet strahlender Körper, 2 Umgebungsfläche

φ_{12} : Sichtfaktor; $\varphi_{12} = \frac{1}{A_1 \pi} \iint_{A_2 A_1} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{r^2} dA_1 dA_2$

Die Sichtfaktoren in Gleichung (6-17) geben die geometrischen Verhältnisse und Positionen im Raum von zwei im Strahlungsaustausch befindliche Flächen. Sie können in der Literatur über Diagramme oder Kalkulationsprogramme³⁸³ ermittelt werden. Schematisch dargestellt, welche Wärmestrahlungsströme berechnet werden müssen, findet sich in Abb. 6-8.³⁸⁴

³⁸¹ Vgl. Stephan et al. 2013, 460ff.

³⁸² Vgl. Stephan et al. 2013, S. 465.

³⁸³ S. Howell 2001. Basiert auf Howell et al. 2016; Kabelac und Vortmeyer 2013.

³⁸⁴ Ein Berechnungsschema zur Ermittlung der Wärmestrahlung ist im Anhang D.2.5 zu finden.

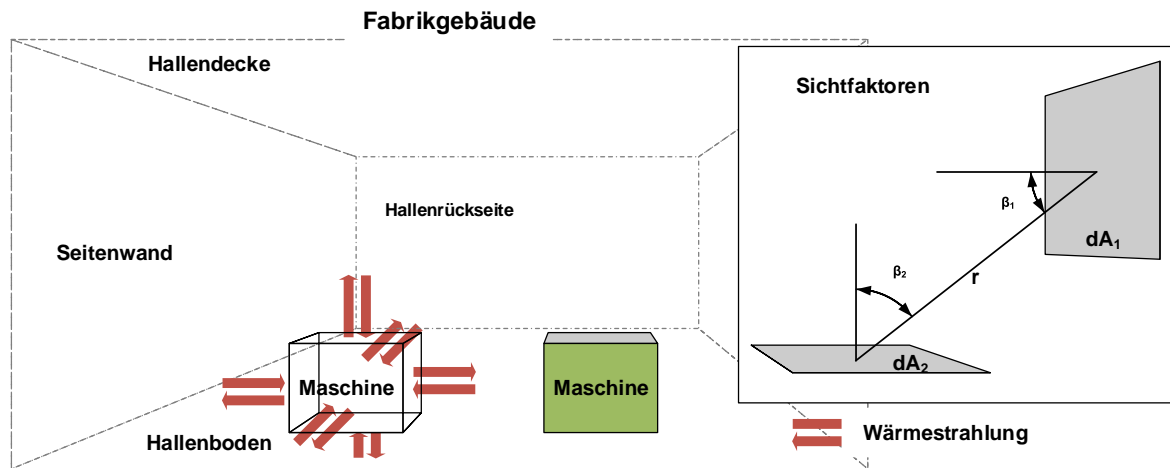


Abb. 6-8: Schema der Wärmeströme durch Wärmestrahlung; im Legendenfenster sind die geometrischen Größen zur Bestimmung der Sichtfaktoren³⁸⁵

Die Wärmetransportvorgänge dQ für die Energiebilanz nach dem ersten Hauptsatz aus Gleichung (6-10) können damit aus den drei zuvor genannten Einzeltermen durch die mathematische Funktion nach Gleichung (6-18) berechnet werden.

$$dQ = \left(\dot{Q}_{WL} + \dot{Q}_K + \sum_{i,j} \dot{Q}_{S i,j} \right) \Delta t \quad (6-18)$$

mit

i, j : Sichtflächenindizes

Δt : Bezugszeitraum der Wärmeströme

6.2.2 Enthalpieströme

Wie bereits in Gleichung (6-10) eingeführt, stellt die spezifische Enthalpie eine wesentliche Größe bei der energetischen Bilanzierung dar. Wie weiter unten gezeigt wird, liefert die Enthalpie die größten Anteile an der Masse gebundener Energie der Gesamtbilanz.

Als Zustandsgröße liefert die Enthalpie eine Aussage über den momentanen Zustand des Systems. Sie ist mit der spezifischen Energie verbunden über den Ausdruck der Gleichung (6-19).³⁸⁶

$$h = u + pv \quad (6-19)$$

Die spezifische innere Energie und damit auch die spezifische Enthalpie werden immer in Bezug auf einen gewählten Bezugszustand angegeben. Absolutwerte der inneren Energie und der Enthalpie sind daher ohne Kenntnis des Bezugszustands nicht aussagekräftig. Bei der Bilanzierung von Zustandsänderungen dagegen ist die Wahl des Bezugszustands unerheblich,

³⁸⁵ Eigene Darstellung. Legendenfenster für die Sichtfaktoren vgl. Stephan et al. 2013, S. 464.

³⁸⁶ Vgl. Hering et al. 2016, S. 176.

da in diesem Fall Konstanten wegfallen.³⁸⁷ Für einfache homogene Stoffsysteme gelten die Funktionsabhängigkeiten nach Gleichung (6-20).³⁸⁸

$$\begin{aligned} u &= u(v, T) \\ v &= v(p, T) \end{aligned} \Rightarrow h = f(p, T) \quad (6-20)$$

Mit der Bildung des totalen Differentials kann der Zusammenhang zwischen den Änderungen der beiden Größen Druck und Temperatur auf die Enthalpie aufgedeckt werden. Die partielle Ableitung bei konstantem Druck wird dabei als spezifische Wärmekapazität c_p bezeichnet, s. Gleichung (6-21).

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp \Rightarrow \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = c_p(p, T) \quad (6-21)$$

Bei der Betrachtung isobarer Zustandsänderungen ($dp = 0$) gibt die Wärmekapazität an, wie sich die Enthalpie verändert. Sie nimmt für die meisten Stoffe bei konstantem Druck mit steigender Temperatur zu. Bei konstanter Temperatur hängt sie in komplizierter Weise vom Druck ab. Diese sogenannten kalorischen Zusammenhänge lassen sich in h, T sowie in h, p Diagrammen darstellen und über Näherungen berechnen.³⁸⁹ Besonderheiten stellen sowohl ideale Gase als auch inkompressible Stoffe dar. Für ideale Gase gilt, dass ihre Enthalpie ausschließlich von der Temperatur, nicht jedoch von ihrem Volumen bzw. dem Druck abhängt.³⁹⁰

Die Betrachtung als ideales Gas gilt für niedrige Drücke allerdings auch in guter Näherung für reale Gase. In der Literatur wird Luft in den genannten Randbedingungen so als ideales Gas behandelt.³⁹¹

Für inkompressible Stoffe wie Festkörper und Flüssigkeiten kann durch die zutreffende Annahme $dv = 0$ und der Definition $c_p = c$ der Zusammenhang in Gleichung (6-22) aus (6-21) abgeleitet werden.³⁹²

$$dh = cdT + vdp \quad (6-22)$$

In Abschnitt 6.1.3 wurde analysiert, dass das reale Produktionsverfahren der wässrigen Reinigung immer einen Behandlungsschritt Trocknen beinhaltet. Aus diesem Grund muss sich mit dem thermodynamischen System der feuchten Luft auseinander gesetzt werden. Die zuvor gemachte Aussage, dass Luft als ideales Gas angesehen werden kann, muss insofern eingeschränkt werden, dass es sich dabei um trockene Luft handeln muss. An dieser Stelle soll deshalb auf die Besonderheiten des Stoffgemischs feuchte Luft eingegangen werden.

Luft trägt immer einen gewissen Anteil an Wasser in sich. Das Wasser kann dabei in unterschiedlicher Form, wie gasförmiger Wasserdampf oder flüssige Nebeltröpfchen vorliegen.

³⁸⁷ Vgl. Stephan et al. 2013, 87f.

³⁸⁸ Vgl. Stephan et al. 2013, S. 97.

³⁸⁹ Vgl. Stephan et al. 2013, S. 98.

³⁹⁰ Vgl. Stephan et al. 2013, S. 101.

³⁹¹ S. Stephan et al. 2013, S. 40.

³⁹² Vgl. Stephan et al. 2013, S. 112.

Liegt das Wasser nur gasförmig vor, spricht man von ungesättigter feuchter Luft. Kommt Wasser in den Kontakt mit trockener Luft, verdunstet dieses solange in die Luft, bis der Partialdruck des Dampfes den Sättigungsdruck des Luft-Dampfgemischs erreicht hat. Der Dampf befindet sich dann im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Luft, die keinen weiteren Dampf mehr aufnehmen kann. Man spricht von gesättigter feuchter Luft. Der Sättigungsdruck der Luft wird von ihrer Temperatur bestimmt und steigt mit ihr an.³⁹³

Die Enthalpie feuchter Luft setzt sich nach dem Gesetz von Dalton³⁹⁴ additiv aus den Enthalpien der trockenen Luft und der des Dampfes zusammen. Die spezifische Enthalpie feuchter, ungesättigter Luft, bezogen auf die Masse der enthaltenen trockenen Luft, berechnet sich durch die Zusammenhänge in Gleichung (6-23).

$$h_{1+x} = \frac{H_{L,feucht}}{m_L} = h_L + \frac{m_D}{m_L} \cdot h_D = c_{p,L} \cdot \vartheta + x \cdot h_D \quad (6-23)$$

mit

m : Gesamtmasse des Gemischs; $m = (1 + x)m_L$; der Index 1+x steht für das Gemisch feuchter Luft

x : Absolute Feuchte; $x = \frac{m_D}{m_L}$

m_L : Masse trockener Luft

m_D : Masse Dampf

$c_{p,L}$: Wärmekapazität trockener Luft

h_D : Spezifische Enthalpie des Dampfes; $h_D = \Delta h_V + c_{p,D} \cdot \vartheta$

Δh_V : Verdampfungsenthalpie des Dampfes bei 0 °C

$c_{p,D}$: Wärmekapazität des Dampfes

Bei den in Gleichung (6-23) angegebenen Funktionen gilt es zu beachten, dass die spezifische Enthalpie feuchter Luft auf die Masse der darin enthaltenen trockenen Luft bezieht. Insbesondere ist die absolute Feuchte x ebenso definiert.³⁹⁵

Die einzelnen Luftströme Zuluft, Druckluft und Abluft sind in Abb. 6-4 zur Übersicht der Energie- und Stoffflüsse eingeführt worden. Die Berechnungsschemata zur Ermittlung ihrer jeweiligen Enthalpien zur Energiebilanz sind im Anhang D.4.1 zu finden.

6.2.3 Energiebilanz der Reinigungsmaschine

Mit den berechneten Variablen der Energiebilanz nach dem ersten Hauptsatz lassen sich die einzelnen Energieflüsse für die Bilanzgrenze einer Reinigungsmaschine aufzeigen. Beispielfhaft ist dies in Abb. 6-9 dargestellt.

³⁹³ Vgl. Böckh und Stripf 2015, 413.

³⁹⁴ John Dalton (1766-1844) war ein britischer Naturforscher und Lehrer. Das nach ihm benannte Gesetz sagt für ein System aus verschiedenen Stoffen einen Gesamtdruck voraus, der sich aus den einzelnen Partialdrücken der Stoffe ergibt, s. Böckh und Stripf 2015, S. 414.

³⁹⁵ Vgl. Böckh und Stripf 2015, S. 419.

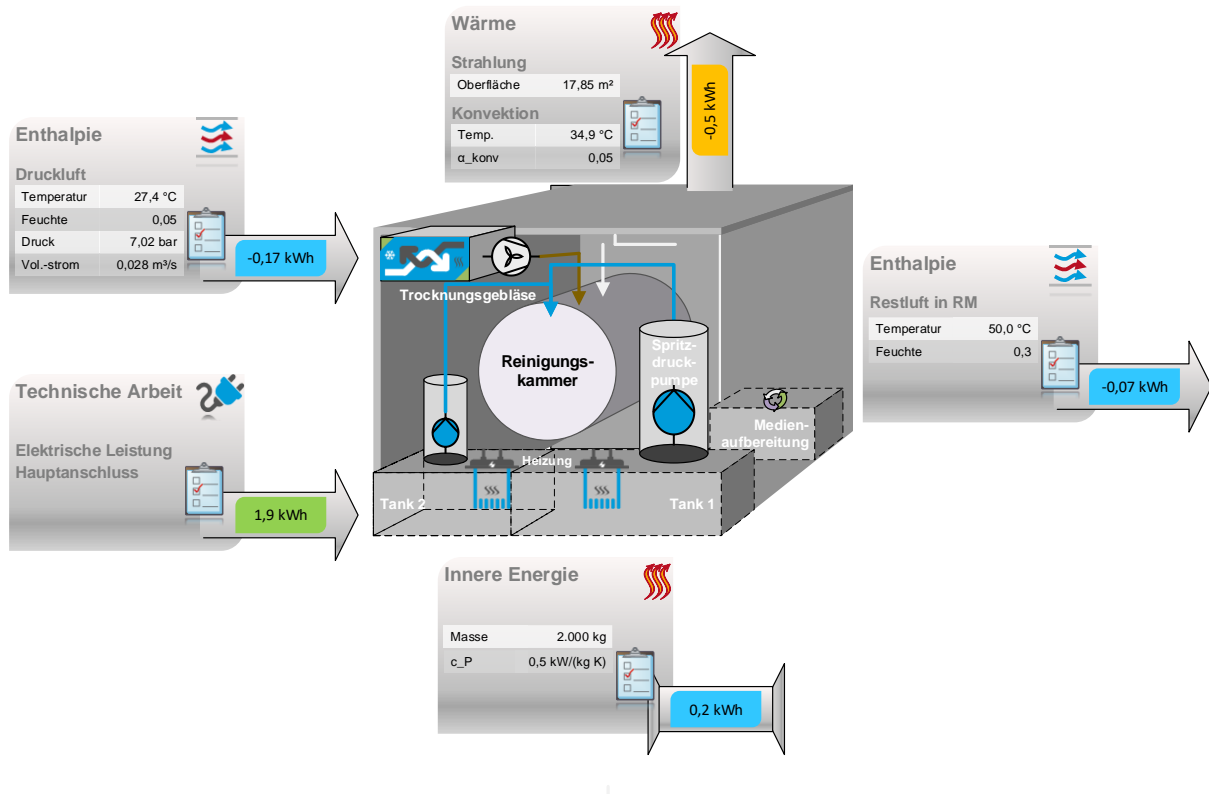


Abb. 6-9: Beispielhafte Ergebnisdarstellung für die Energiebilanz einer Reinigungsmaschine ohne Bauteile³⁹⁶

In der Abbildung sind die über die Bilanzgrenze ein- und austretenden Energieflüsse in Form von technischer Arbeit, Enthalpie und Wärme dargestellt. Sollte über den Bilanzzeitraum die Temperaturen des Systems ansteigen, so geht dies als positive innere Energiedifferenz in die Energiebilanz mit ein.

6.2.4 Energiebilanz der Reinigungskammer

Ebenso wie bei der Bilanz der Reinigungsmaschine lässt eine Bilanz nach dem ersten Hauptsatz auch für die Reinigungskammer selbst aufstellen. Auch hier müssen die Energieflüsse ermittelt werden. Beispielhaft ist dies in Abb. 6-10 gezeigt.

³⁹⁶ Eigene Darstellung.

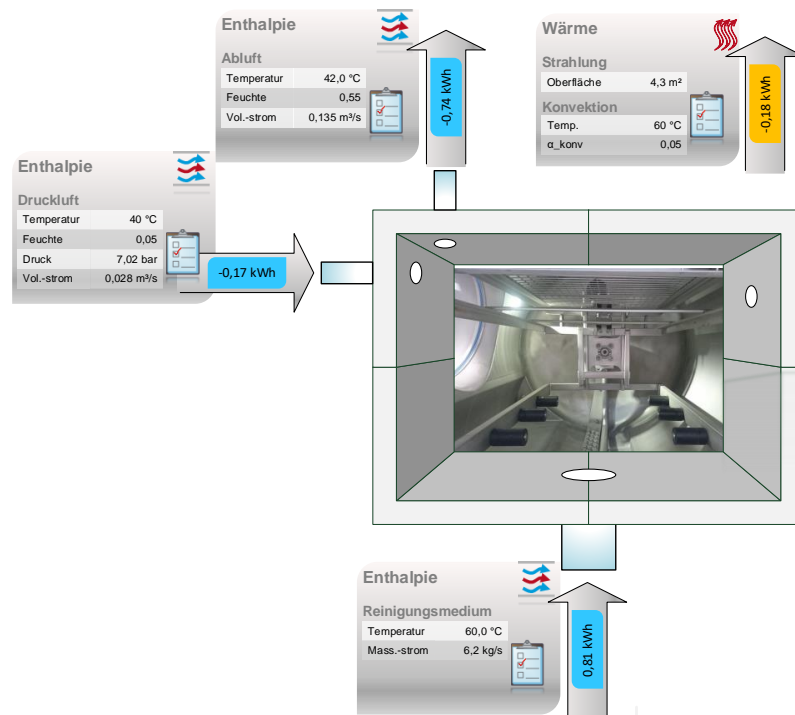


Abb. 6-10: Energiebilanz für das System Reinigungskammer mit den Energieflüssen und den wesentlichen Variablen und Parameter³⁹⁷

6.3 Aufbau und Strukturanalyse einer wässrigen Bauteilreinigungsanlage

Bisher wurden zur Berechnung der Energieminima, die einzelnen Energieumformterme ermittelt und berechnet. Diese für einen idealisierten Reinigungsvorgang sinnvolle Herangehensweise schlägt zur Bilanzierung einer gesamten Reinigungsanlage fehl. Zwei wesentliche Faktoren sind dafür verantwortlich:

- Für alle wesentlichen Funktionsaggregate und auch die Reinigungsmaschine selbst werden elektronische Steuerungskomponenten benötigt.
- Es sind Energiebedarfe zum Transport von Energien erforderlich.

Für den ersten Faktor lässt sich nicht exakt ermitteln, auf welchem Niveau ein energetisch-reales Minimum für eine Steuerung mit dazugehöriger Sensorik und Aktorik liegt. Die Vielzahl an kombinatorischen Möglichkeiten, das tatsächliche Minimum zu definieren, übersteigt den Erkenntnisgewinn bei Weitem. Der zweite Faktor ist von den jeweiligen Gegebenheiten und Maschinenspezifikationen abhängig. Die Fluidströme werden im Wesentlichen durch den Leitungslängen bestimmt. Diese hängen vom Maschinenaufbau und Komponenten ab, sodass auch hier die Angabe des energetisch-realen Minimums keine allgemeingültige Aussagekraft besitzt.

Vielmehr erscheint an dieser Stelle die Analyse einer vorliegenden Maschine und deren energetisches Verhalten sinnvoll. Dazu wird die Verbrauchs- und Nutzungsgruppen orientierte Maschinenstrukturanalyse durchgeführt. Zunächst soll für die weiteren Untersuchungen in diesem Kapitel der grundsätzliche Aufbau einer wässrigen Reinigungsanlage erläutert

³⁹⁷ Eigene Darstellung.

werden. Eine schematische Darstellung einer Reinigungsmaschine und der wesentlichen Komponenten ist in Abb. 6-11 abgebildet.

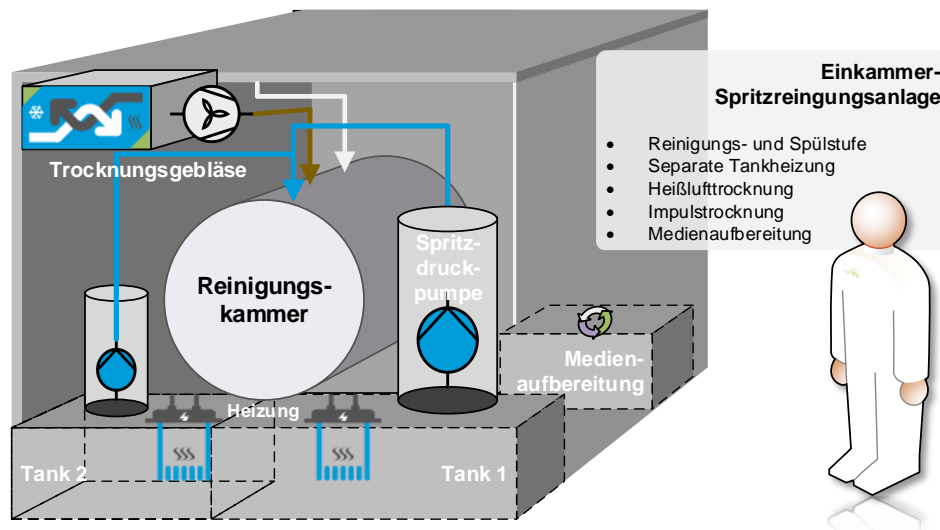


Abb. 6-11: Schematische Darstellung einer wässrigen Reinigungsanlage und der Nennung der wesentlichen funktionellen Komponenten³⁹⁸

Der Aufbau und die installierten Komponenten richten sich nach Einsatzzweck und definierter maschineller Anforderungen. Im Wesentlichen sind bei wässrigen Spritzreinigungsanlagen immer die Reinigungskammer (Mehrkammeranlagen sind ebenfalls üblich), Medientanks, Medienaufbereitung, Pumpaggregate und eine Trocknungseinheit (diese können auch separat der Reinigungsanlage nachgelagert sein).

6.3.1 Verbrauchs- und Nutzungsgruppen orientierte Maschinenstrukturanalyse

Ausgehend von einer Maschine im Bestand ist es zielführend, sich anhand eines Maschinenstrukturmodells über die energetisch relevanten Komponenten und deren Wirkungskette einen Überblick zu verschaffen. Diese Betrachtungsart hat sich im Bereich von Energiebilanzierung von Werkzeugmaschinen bereits sehr verbreitet³⁹⁹. Eine Anlage zur wässrigen Bauteilreinigung beinhaltet die in Abb. 6-12 aufgeführten energierelevanten Baugruppen.

Für eine Reinigungsmaschine können drei übergeordnete Funktionsgruppen identifiziert werden:

- Reinigungsmedien,
- mechanische Unterstützung,
- Trocknung.

Je nach Ausführung der Maschine ist die Funktionsgruppe Reinigungsmedien mehrfach vorhanden. Dies hängt von der jeweiligen Anzahl an Reinigungs- und Spülstufen ab. Die mechanische Unterstützung umfasst mögliche Antriebssysteme für Düsensysteme in der Reinigungskammer und Antriebe zur Bewegung der Bauteile, wie Korbbrotation. Zusätzlich können

³⁹⁸ Eigene Darstellung.

³⁹⁹ Vgl. Eisele 2014; Schrems 2014; Abele et al. 2012; Kuhrke 2011; Götze et al. 2010;

auch Ultraschallbaugruppen, Rührwerke oder Vakuumpumpen zur mechanischen Unterstützung zum Einsatz kommen. Der Funktionsgruppe Trocknung sind alle Baugruppen zuzurechnen, die das Bauteil nach der Reinigung von liquiden Fluiden zu befreien. Dabei werden Gebläse, Ventilatoren und Verdichter, Heizelemente, Kühlaggregate und verwendet. Nebenaggregate als Elemente der energierelevanten Baugruppen sind je nach Anlage verschieden. SPS, Schaltschrankkühlung, Beleuchtung u.v.m. können je nach Leistungsaufnahme einzeln analysiert werden oder als Gruppe sonstige aggregiert werden.

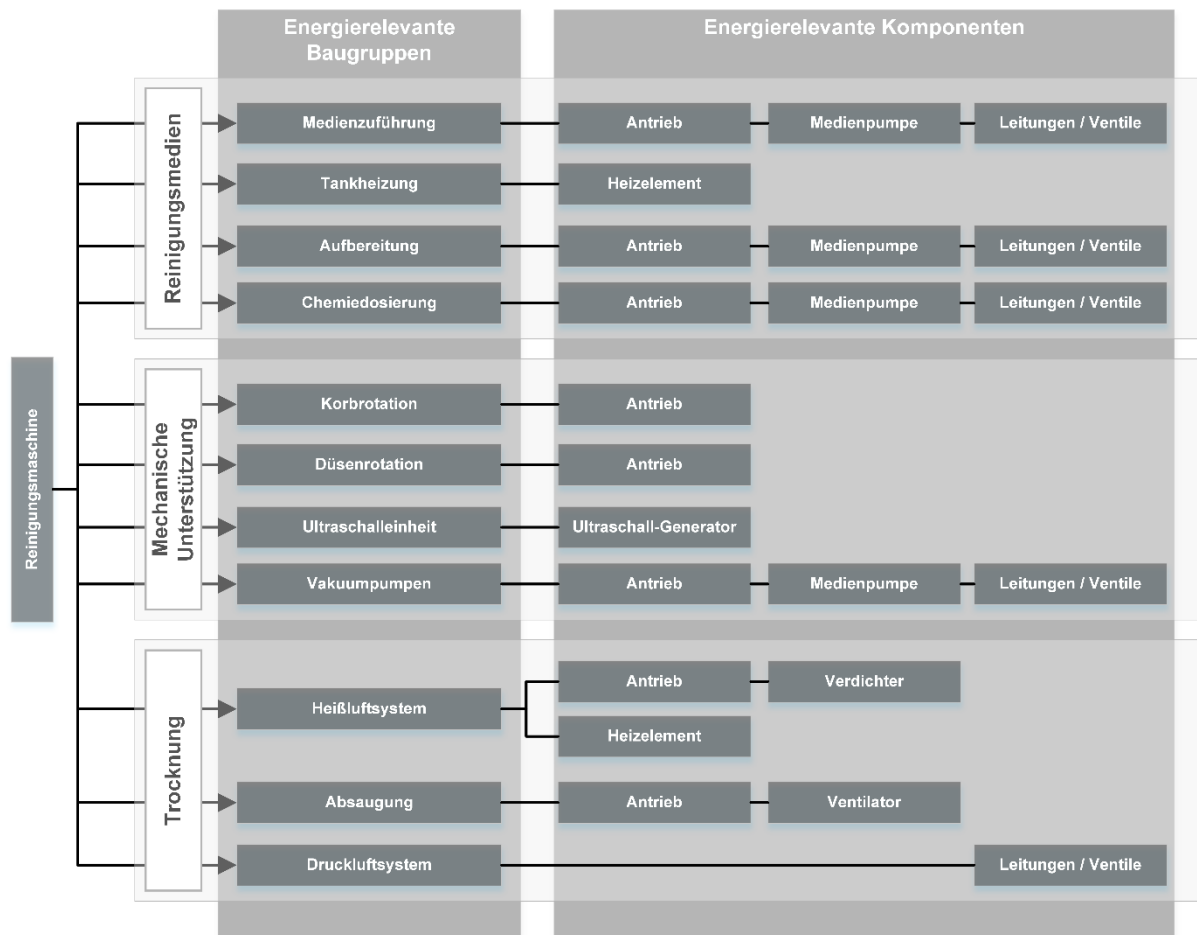


Abb. 6-12: Verbrauchsgruppen⁴⁰⁰ orientierte Struktur einer Reinigungsmaschine untergliedert in drei Funktionsgruppen, die verschiedene Baugruppen (aufgebaut aus verschiedenen Komponenten) zusammenfassen⁴⁰¹

Die Baugruppen werden in einzelne Komponenten gegliedert. So setzt sich die Baugruppe Medienzuführung aus einem Antrieb einer Medienpumpe, als Beispiel für die Energieaufnahme bzw. -wandlung, und in die Elemente der Energiedissipation, wie Leitungen, Ventile und Düsen zusammen. Mit dieser Gruppierung und Aufschlüsselung der energierelevanten Baugruppen und Komponenten können erste einfache Analysen durchgeführt werden. Dabei werden mittels der technischen Dokumentation, der Typenschilder und der Maschineneinstellungen benötigte Daten und Information zur ersten energetischen Auswertung herangezogen.

⁴⁰⁰ Vgl. Schrems 2014.

⁴⁰¹ Je nach Variante und Ausstattung einer Maschine können mehrere Funktionsgruppen *Reinigungsmedien* vorliegen. Dies hängt von der Anzahl an Reinigungs- und Spülstufen der Maschine ab. In der Maschinenstruktur sollte dann Reinigungsmedien 1,2 usw. entsprechend deklariert sein.

Die technische Dokumentation mit Elektroplan der Maschine enthält in der Regel alle Angaben zu Leistungsaufnahmen im Nennbetriebspunkt der Komponenten. Sind diese nicht mehr vollständig, können fehlende Daten auch den Typenschildern entnommen werden.

Nach erfolgter Verbrauchsgruppenstrukturierung können gesammelte Daten aufbereitet werden. Die absteigende Nennleistungssortierung bietet einen ersten Überblick über die energetische Relevanz der Baugruppe, s. Tab. 6-1.

Tab. 6-1: Absteigende Sortierung der Komponentennennleistung einer beispielhaften Reinigungsmaschine

Komponente	Nennleistung [kW]	Verhältnis zum Anschlusswert der Gesamtmaschine [%]	Akkumulierte Einzelverhältnisse [%]
Heizelement Medientank 1 ⁴⁰²	15	25	25
Heizelement Medientank 2 ⁴⁰³	15	25	49
Heizelement Trocknung	8	13	62
Spritzdruckpumpe 1	7,5	12	75
Seitenkanalverdichter	5,5	9	84
Spritzdruckpumpe 2 ⁴⁰⁴	4	7	90
Ventilator Abluft	0,55	1	91
Gesamtmaschine	61 [kVA]	100	-

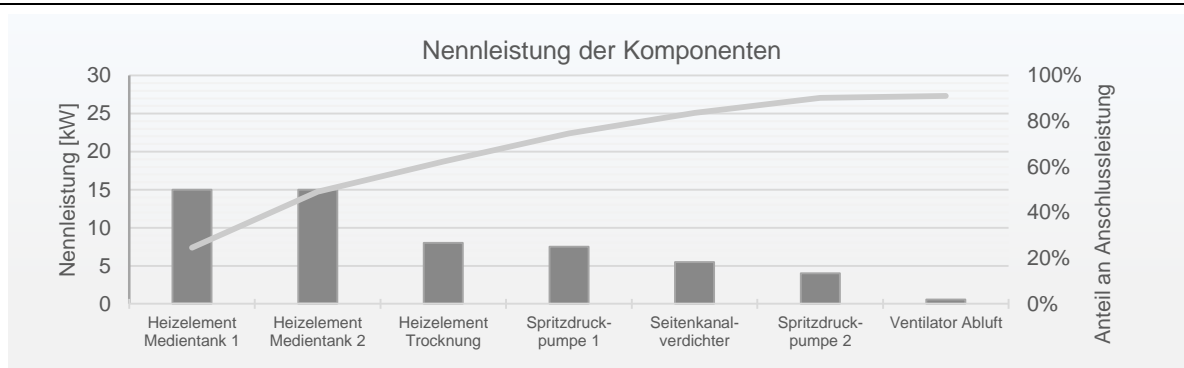


Abb. 6-13: Nennleistung einzelner Komponenten und deren Anteil an der Anschlussleistung der Gesamtmaschine⁴⁰⁵

Für die in Tab. 6-1 aufgeführten Komponenten und der Versuchsmaschine hat die Spritzdruckpumpe 2 eine veränderliche Leistungsaufnahme. Der Maschinennutzer legt den Betriebsdruck im Reinigungsprogramm selbst fest. Über einen Frequenzumrichter wird die Drehzahl des Pumpenmotors variiert und somit auch der Leistungsbedarf angepasst. Alle anderen Komponenten fahren in festgelegten Betriebspunkten und werden nur über Hysterese-regelung oder Programmkonfigurationen ein- bzw. ausgeschaltet. Nicht in der Tabelle aufgeführt sind die Antriebe für die Werkstückrotation. Der Antrieb hat eine Nennleistungsaufnahme von 0,05 kW und trägt somit unter ein Prozent zur Gesamtanschlussleistung bei.

⁴⁰² Fakultativ. Für den Fall einer elektrischen Heizung.

⁴⁰³ Fakultativ. Im Falle einer 2-Bad-Reinigungsmaschine.

⁴⁰⁴ S. Fußnote 233.

⁴⁰⁵ Eigene Darstellung. Vgl. Schrems 2014, S. 49.

Die Leistungsaufnahme im Betrieb hängt sowohl von der Rotationsgeschwindigkeit als auch von der Chargenmasse ab und kann somit auch deutlich unter der Motornennleistung liegen.

6.3.2 Nutzungsprofile der Verbrauchsgruppen in einer Reinigungsmaschine

Von der Anschlussleistung einer Komponente kann nur sehr ungenau auf das tatsächliche energetische Verhalten geschlossen werden. Dazu bedarf es einer Berücksichtigung der zeitlichen Einflüsse über die qualitative Analyse von Nutzungsprofilen. Abweichend von der Nennleistung können die verschiedenen Aggregate und Komponenten während des Betriebes unterschiedliche Momentanleistungen aufweisen. Dies ist von der jeweiligen Gerätekonfiguration und der MSR-Technik⁴⁰⁶ abhängig.

Wesentlich für eine Energiebedarfsanalyse ist neben der Ermittlung der Leistungsaufnahme der einzelnen Verbrauchsgruppen deren zeitliche Nutzung. Die zeitliche Dimension lässt sich in verschiedene Horizonte unterteilen:

- zeitlicher Horizont eines Reinigungsprozesses
- Abfolge mehrerer Reinigungsprozesse
- ganze Produktionsschichten bis hinauf zu Jahresbilanzierungen

Je nach betrachtetem Zeithorizont ergeben sich unterschiedliche energetische Zustände, die verschiedene Aussage liefern, ja nach bilanzierter Systemgrenze. Diese Zustände lassen sich im Wesentlichen auf das Steuerungs- bzw. Regelungsverhalten zurückführen und beschreiben. Es können stationäre und instationäre Nutzungsprofile unterschieden werden⁴⁰⁷. Instationäre Nutzungsprofile unterteilen sich nochmals in zyklische und prozessabhängige Verhalten, s. Abb. 6-14.

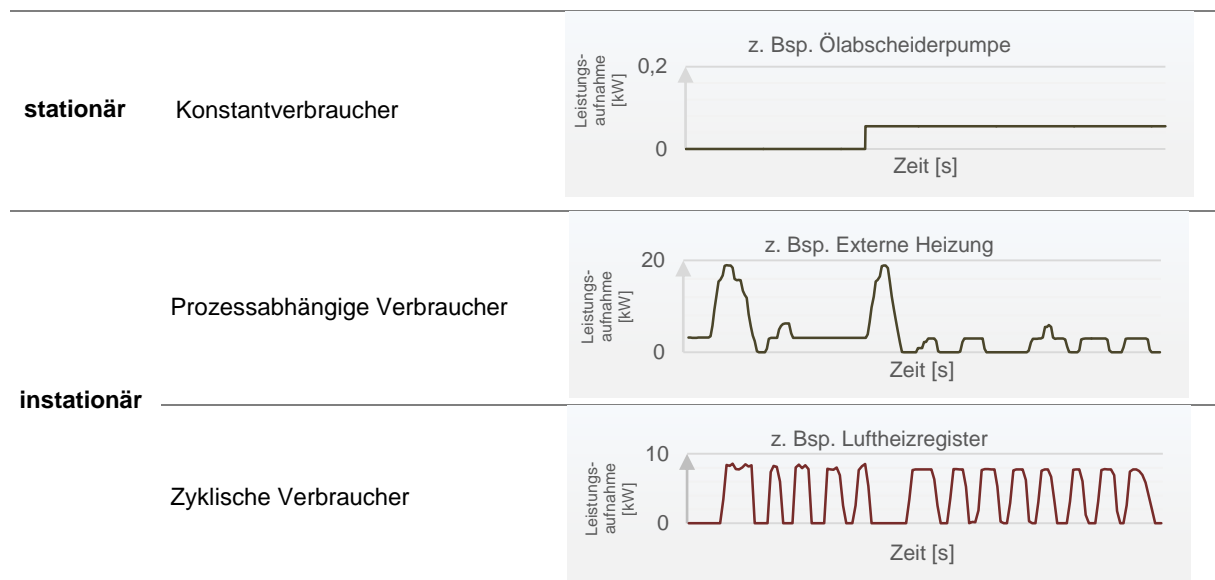


Abb. 6-14: Zustandsbeschreibung der Nutzungsprofile der Verbrauchsgruppen⁴⁰⁸

⁴⁰⁶ MSR-Technik steht für Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik.

⁴⁰⁷ S. Kuhrke 2011 und Schrems 2014.

⁴⁰⁸ Eigene Darstellung. Vgl. Eisele 2014, S. 15.

6.4 Energiebilanz unter Einbeziehung von Einflussfaktoren

Um für vergleichende Energiebilanzen die gleichen Randbedingungen zu verwenden, ist die Identifikation von normalisierenden Variablen erforderlich.⁴⁰⁹ Die Identifikation dieser Variablen ist das Aufstellen eines Ursache-Wirkungs-Diagramms eine häufig genutzte Methode.⁴¹⁰ In Abb. 6-15 sind das Diagramm für die wässrige Bauteilreinigung dargestellt.

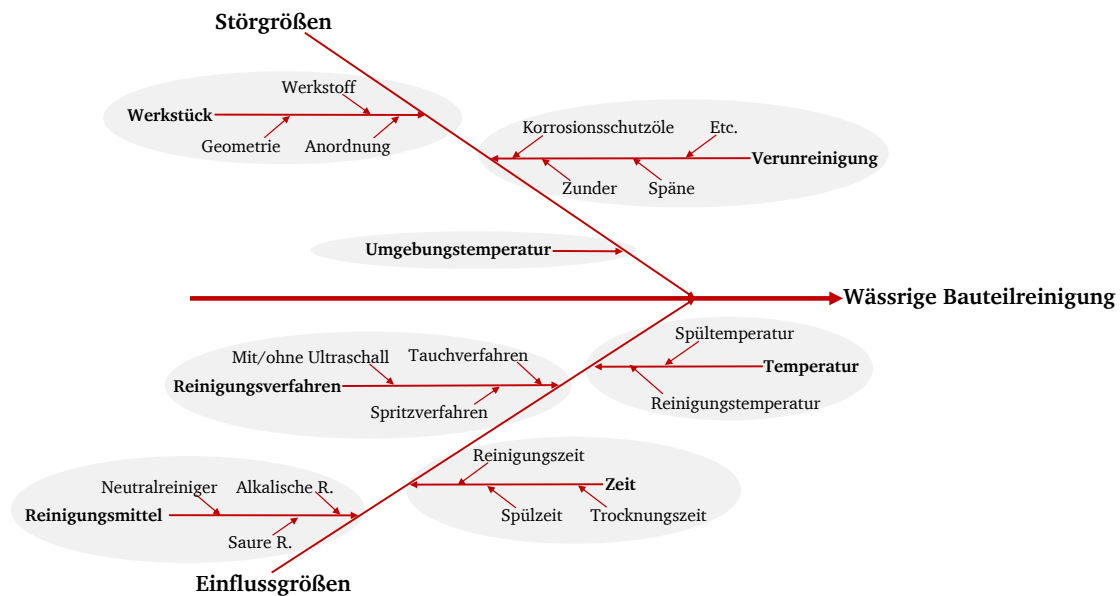


Abb. 6-15: Einfluss- und Störgrößen der wässrigen Bauteilreinigung⁴¹¹

Darin sind auf der oberen Hälfte die als Störgrößen gekennzeichneten nicht beeinflussbaren Variablen (variable Einflussfaktoren) aufgeführt. In der unteren Hälfte sind alle beeinflussbaren Faktoren zusammengefasst. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie direkt gesteuert werden können. Sie werden auch als statische Einflussfaktoren bezeichnet und sind für eine Normalisierung der in Energiebilanzen berechneten Größen geeignet.

Statische Einflussfaktoren

Die statischen Einflussfaktoren als Normalisierungsgrundlage für vergleichende Energiekennzahlen sind vor allem die festzulegenden Reinigungsprogrammschritte und deren auftretende Häufigkeit. Weiterhin ist die Auslastung, im Sinne der Energiebilanz der Massenstrom an Bauteilen, und die Solltemperatur der Reinigungsverfahren wesentlich für den Energiebedarf. Die Ermittlung der Energiekenngrößen ist ohne Angabe dieser Einflussfaktoren nicht zielführend.⁴¹²

⁴⁰⁹ Vgl. DIN ISO 50006, S. 36.

⁴¹⁰ S. Ishikawa 1997, S. 230.

⁴¹¹ Eigene Darstellung. Vgl. Ishikawa 1997, S. 230.

⁴¹² S. Fußnote 409.

Variable Einflussfaktoren

Der Bedarf der thermischen Energie ist in hohem Maße von der Umgebungstemperatur abhängig, bei der die Reinigungsmaschine betrieben wird. Mittels eines zeitlichen Verlaufs des Wärmebedarfs und gleichzeitigem Vergleich mit der Umgebungstemperatur kann ein möglicher Zusammenhang untersucht werden. In Abb. 6-16 ist dies für einen konstanten Betrieb einer Reinigungsmaschine dargestellt.

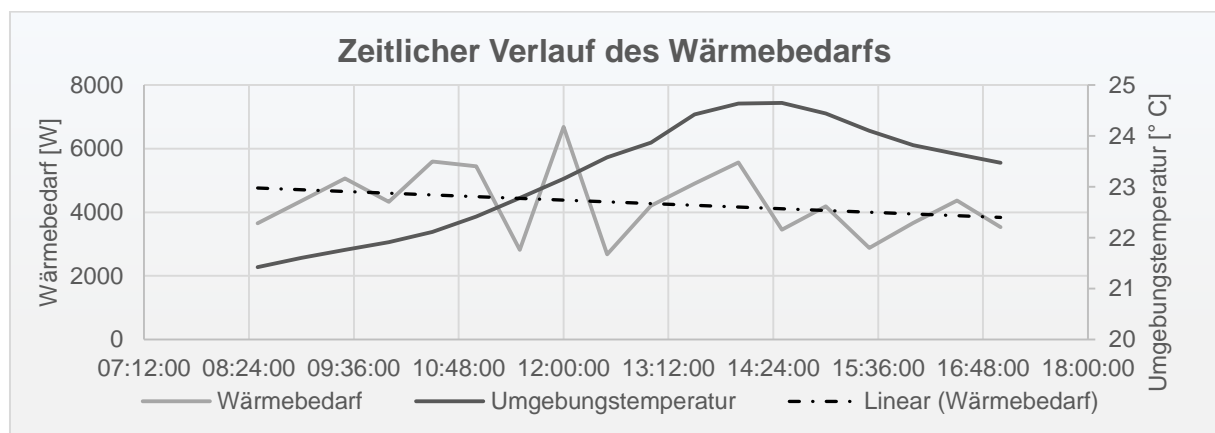


Abb. 6-16: Wärmebedarf einer Reinigungsmaschine über einen Nutzungszeitraum von 8 Stunden⁴¹³

Im gezeigten Diagramm kann eine inverse Abhängigkeit des Wärmebedarfs von der Umgebungstemperatur angenommen werden. Über einen Zeitraum von acht Stunden steigt die Umgebungstemperatur bis zum Nachmittag kontinuierlich an. Bei Betrachtung einer linearen Trendkurve fällt diese im gleichen Zeitraum sukzessive.

Werden größere Zeiträume betrachtet und die Anlagen bei verschiedenen Betriebszuständen und Temperaturen vermessen, kann ebenfalls eine inverse Abhängigkeit des thermischen Energiebedarfs von der Temperatur identifiziert werden. Hierfür werden eine große Anzahl einzelner Messdaten benötigt. Über einen Zeitraum von einem Jahr sind jeweils die thermischen Leistungsaufnahmen in die Reinigungsmaschine gemessen worden. Gleichzeitig wurde die Umgebungstemperatur ermittelt. Die jeweiligen 30-minütigen Mittelwerte beider Messgrößen sind im Diagramm in Abb. 6-17 dargestellt.

⁴¹³ Eigene Darstellung.

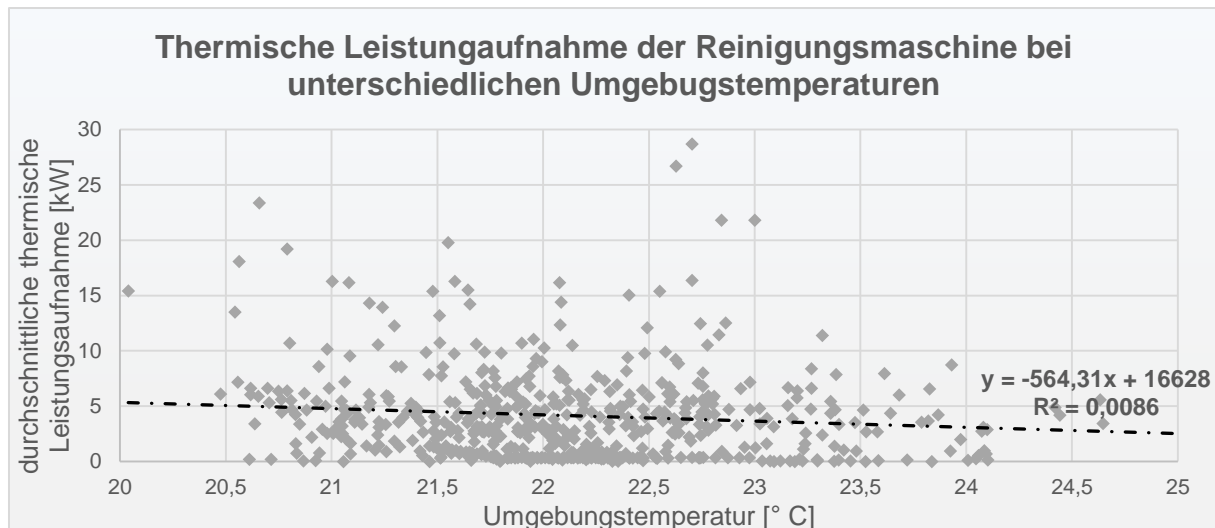


Abb. 6-17: Gemessene Umgebungstemperatur der jeweiligen thermischen Leistungsaufnahme; gemittelt über 30 Minuten⁴¹⁴

Wird ein linearer Funktionszusammenhang zugrunde gelegt, so ist in diesem Beispiel in dem angegebenen Temperaturintervall von etwa 560 W zusätzlichem Wärmebedarf pro Kelvin auszugehen.

Es zeigt sich auch hier eine fallende Trendlinie der thermischen Leistung mit steigender Umgebungstemperatur. Das Bestimmtheitsmaß bzw. der quadratische Fehler der linearen Funktion sind sehr groß. Eine weitere Möglichkeit zur Analyse des variablen Einflussfaktors Umgebungstemperatur ist in Abschnitt 7.2.3 erläutert.

⁴¹⁴ Eigene Darstellung.

7 Energieeffizienzanalyse einer wässrigen Bauteilreinigung an einem Beispielverfahren

In diesem Kapitel erfolgt nun die Validierung der in den Kapiteln 3 - 6 theoretisch behandelten Energieeffizienzanalyse. Dies erfolgt anhand einer Produktion für ein gedrehtes Bauteil für eine Axialkolbenpumpe. Die Energieeffizienzanalyse erfolgt mittels MVC-Methode invers zur den bisherigen inhaltlichen Erläuterungen. Das heißt, dass die sieben energetischen Minima des Schalenmodells, s. Abb. 3-3, von außen nach innen ermittelt werden. Dieser Top-Down-Ansatz folgt einem Energiebedarfsoptimierungsprozess, wie er für eine bestehende Anlage in der metallverarbeitenden Industrie durchgeführt werden würde.⁴¹⁵

Dazu werden im ersten Unterkapitel die Fertigungskette, das Bauteil und die Reinigungsanlage spezifiziert. Daran lassen sich die wichtigsten Randbedingungen der Reinigungsaufgabe ableiten. Anschließend wird in Unterkapitel 7.2 der Energiebedarf der Reinigungsmaschine in der laufenden Produktion ermittelt – das EBM (s. 3.3.4).

7.1 Wässrige Bauteilreinigung innerhalb einer Fertigungskette einer zerspanenden Produktion

Die in diesem Kapitel durchgeführten Analysen beruhen auf einer Produktion zur Fertigung einer gedrehten Steuerscheibe, die als Bauteil in einer Axialkolbenpumpen in Ölhydraulikanwendungen verwendet wird. Der Ablauf der Fertigung und die eingesetzten Maschinen sind in Abb. 7-1 dargestellt.



Abb. 7-1: Prozesskette ETA-Fabrik⁴¹⁶

In einem zweistufigen Drehprozess werden auf einer Vertikaldrehmaschine die geometrischen Formen erzeugt. Dabei kommen verschiedene zerspanende Verfahren, wie Bohren und Fräsen, zur Anwendung. Nach der Einzelteilbearbeitung werden die Bauteile in Reinigungskörben chargiert und Reinigungsanlage zugeführt. Die Reinigung dient als Oberflächenbe-

⁴¹⁵ Vgl. Hesselbach 2012, 56ff.

⁴¹⁶ S. Worms und Radermacher 2018, S. 279.

handlung zur Vorbereitung einer Wärmebehandlung. Dabei handelt es sich um ein thermochemisches Verfahren zur Randschichtenhärtung mittels Nitrieren. Molekularer Stickstoff diffundiert über die Oberfläche zur Bildung einer verformten Gitterstruktur des Nitrierstahls. Ziel ist es, die notwendigen tribologischen Eigenschaften der Bauteile zu erzeugen. Nach dem Nitrieren werden die Funktionsflächen geschliffen und nach einem erneuten wässrigen Reinigungsvorgang für die anschließende Montage präpariert.

Die beschriebene Fertigungskette, die die Grundlage für die Validierung in dieser Arbeit bildete, adaptiert die Produktion eines Herstellers für Hydrauliksysteme. Dabei steht im Vordergrund, dass Funktionen, Qualität und Quantität der Bauteile der Forschungsprozesskette denselben Normen und Herstellungskriterien unterliegen und eingehalten werden.⁴¹⁷

7.1.1 Bauteilbeschreibung

Die betrachtete Fertigung dient der Herstellung einer Steuerscheibe für eine Axialkolbenhydraulikpumpe. Die Hauptfunktion besteht in der Förderung von Öl in hydraulischen System mit einem Nenndruck von 350 bar. Die wesentlichen Eigenschaften der Steuerscheibe bestehen im Widerstand des tribologischen Verschleißes. Als Baukastenbaugruppe werden verschiedene Modellgrößen gefertigt, wobei in dieser Arbeit nur eine Modellreihe im Fokus der Untersuchung steht. Die Bauteilkenngröße und Merkmale sind in Tab. 7-1 aufgelistet.

Tab. 7-1: Kenngrößen und Merkmale des Versuchsbauteils

Kenngröße	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Durchmesser	d_B	0,09	[m]	
Masse	m_B	0,275	[kg]	
Volumen	V_B	3,49	($\cdot 10^{-5}$) [m ³]	
Oberfläche	A_B	1,53	($\cdot 10^{-2}$) [m ²]	
Werkstoff	-	1.8524	-	Nitrierstahl
Dichte	ρ_B	7762	[kg/m ³]	

Die Steuerscheibe ist in Abb. 7-2 dargestellt. In der Grafik wurde die Funktionsfläche gelb markiert. In diesem Bereich der Oberfläche treten die größten Belastungen auf. Das Bauteil verfügt über keine reinigungskritischen geometrischen Besonderheiten. Eine Vertiefung auf der Unterseite als Ölreservoir besitzt ein Tiefen-/Durchmesserverhältnis < 1 , was somit als günstig für die Reinigung angesehen werden kann.⁴¹⁸

⁴¹⁷ Die Arbeiten fanden im Rahmen des Forschungsprojekts ETA-Fabrik (Energieeffizienz, Technologie- und Anwendungszentrum) statt. Das Ziel der ganzheitlichen Energieeffizienzsteigerung einer metallverarbeitenden Produktionsstätte durch Optimierung der interagierenden Fabriksysteme Gebäude, technische Gebäudeausrüstung und Produktionsanlagen konnte bereits erfolgreich auf reale Produktionsstätten übertragen werden, s. Abele et al. 2018.

⁴¹⁸ S. Kloke 2003, 147ff.

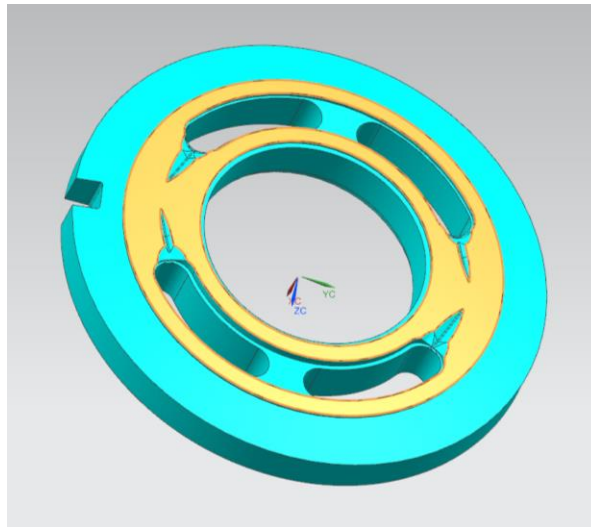


Abb. 7-2: Computergenerierte Darstellung der Steuerscheibe; Gelb markiert ist die Funktionsfläche⁴¹⁹

Zur Bestimmung der Mikrostruktur wurden dreidimensionale Flächenprofilen vermessen, um die arithmetische Mittenrauheit zu ermitteln (Abb. 7-3).

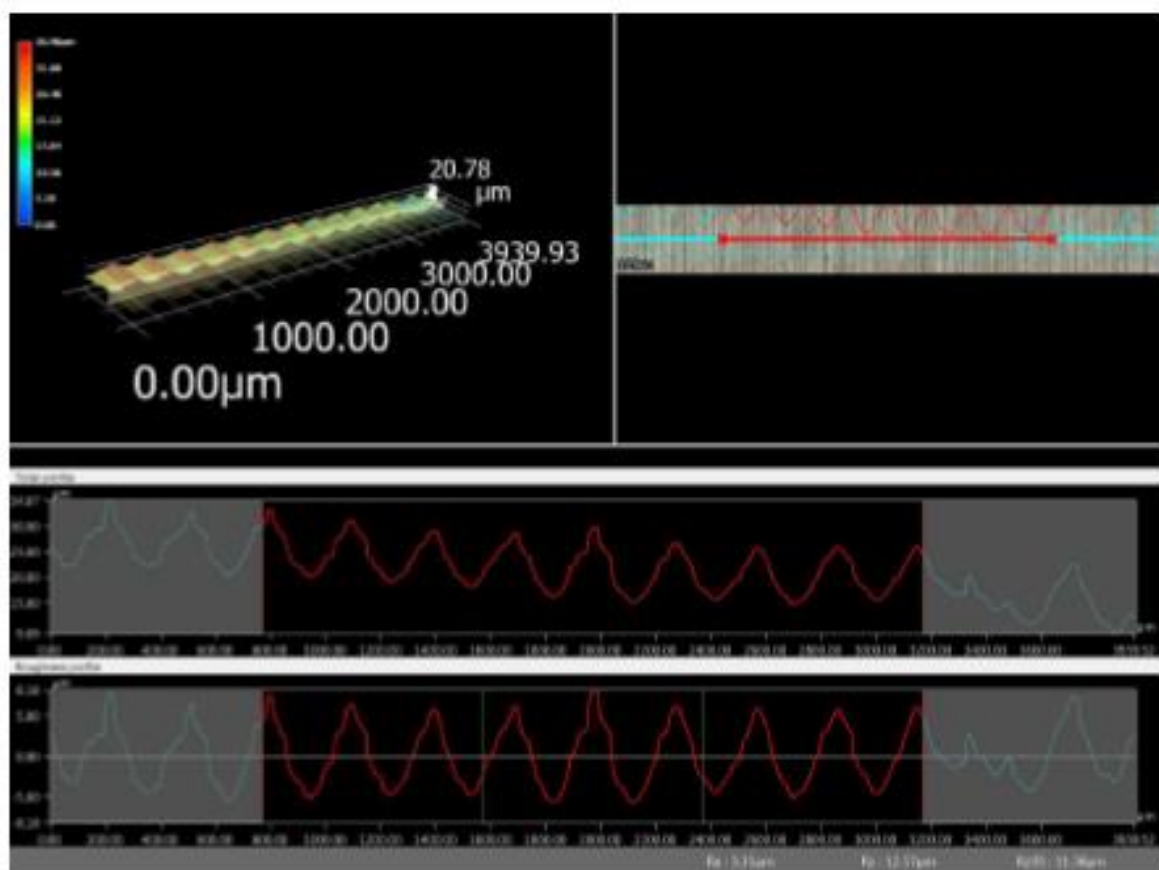


Abb. 7-3: 3D-Profil und Längsschnitt des Oberflächenprofils⁴²⁰

⁴¹⁹ Eigene Darstellung.

⁴²⁰ Bildquelle: Petruschke, L. (Masterthesis, TU Darmstadt). Die Erlaubnis zur Verwendung in dieser Arbeit wurde erteilt.

Es fanden für verschiedene Zerspanungsparameter entsprechende Rauheitsprofilvermessungen statt. Das entsprechende Oberflächenprofil ist in Abb. 7-4 dargestellt.

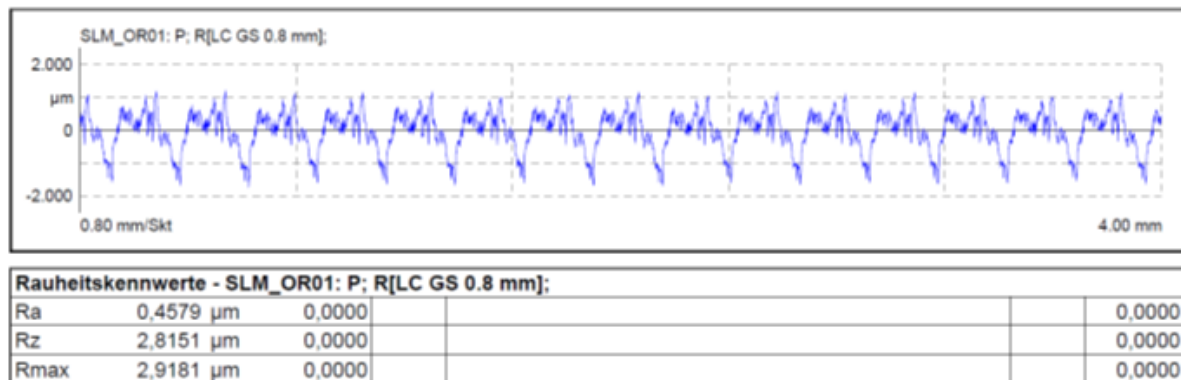


Abb. 7-4: Gemessene Rauheiten verschiedener Werkstückgruppen⁴²¹

Die gemessenen Rauheiten können, wie in Abschnitt 4.3.5 beschrieben, mit der Oberflächenstruktur der Partikel korreliert werden.

7.1.2 Erforderliche technische Sauberkeit

Für das Bauteil Steuerscheibe wurde der CCC bestimmt. Um zu evaluieren, wie viele Partikel entfernt wurde, fanden Partikelextraktionen jeweils vor der Reinigung und nach der Reinigung statt. Die Ergebnisse sind in Tab. 7-2 wiedergegeben.

Tab. 7-2: Restschmutzanalyse der Referenzfertigung jeweils vor und nach der Reinigung

Partikelgröße [µm]	Code	Referenz Zerspanung [Anzahl]	nach Referenz Reinigung [Anzahl]
50 - 100	E	238	249
100 - 150	F	166	27
150 - 200	G	97	12
200 - 400	H	107	0
400 - 600	I	26	0
600 - 1000	J	12	0
> 1000	K	5	0

Es lässt sich ableiten, dass Partikel ab der Größenklasse H vollständig entfernt werden und Partikel mit einem Feretmax-Durchmesser kleiner als 100 µm nicht mehr von der Reinigung beeinflusst werden und somit auf dem Bauteil verbleiben.

⁴²¹ Bildquelle: Petruschke, L. (Masterthesis, TU Darmstadt). Die Erlaubnis zur Verwendung in dieser Arbeit wurde erteilt.

Neben der Partikelentfernung spielen für den weiteren Fertigungsprozess die filmischen Verunreinigungen eine wesentliche Rolle. Deswegen wurde auch die Masse der Kohlenwasserstoffverbindungen (HC-Verbindungen) bestimmt. Die jeweiligen extrahierten Massen sind im Diagramm in Abb. 7-5 dargestellt.

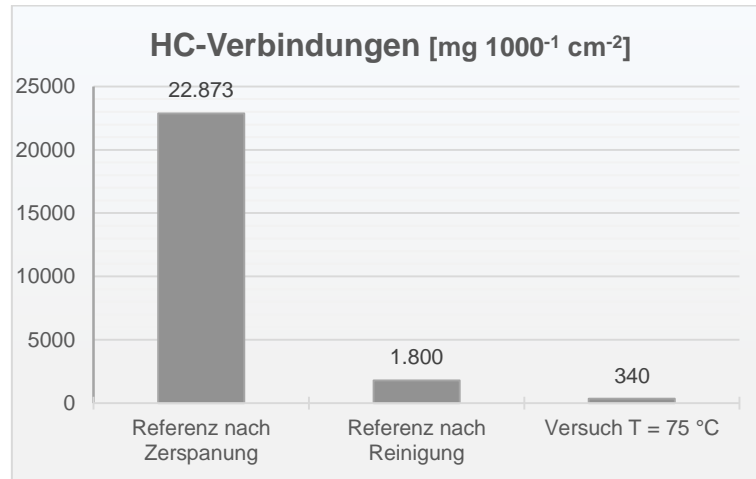


Abb. 7-5: Masse der filmischen Verunreinigungen normiert auf eine Bauteiloberfläche von 1000 cm² ⁴²²

Es zeigt sich, dass eine vollständige Entfernung der filmischen Verunreinigungen nicht notwendig ist, um eine erfolgreiche Nitrierbehandlung der Bauteile zu gewährleisten. Die Versuchsreinigung übererfüllt die Anforderungen um annähernd des sechsfache, sodass die Qualität der Oberfläche sichergestellt ist.

Um die Abhängigkeit des Reinigungserfolgs von der Temperatur zu evaluieren, wurden Messungen der Partikelverschmutzung durchgeführt. Dabei zeigte sich eine deutliche Korrelation der Reinigungsleistung zu höheren Medientemperaturen, s. Abb. 7-6.

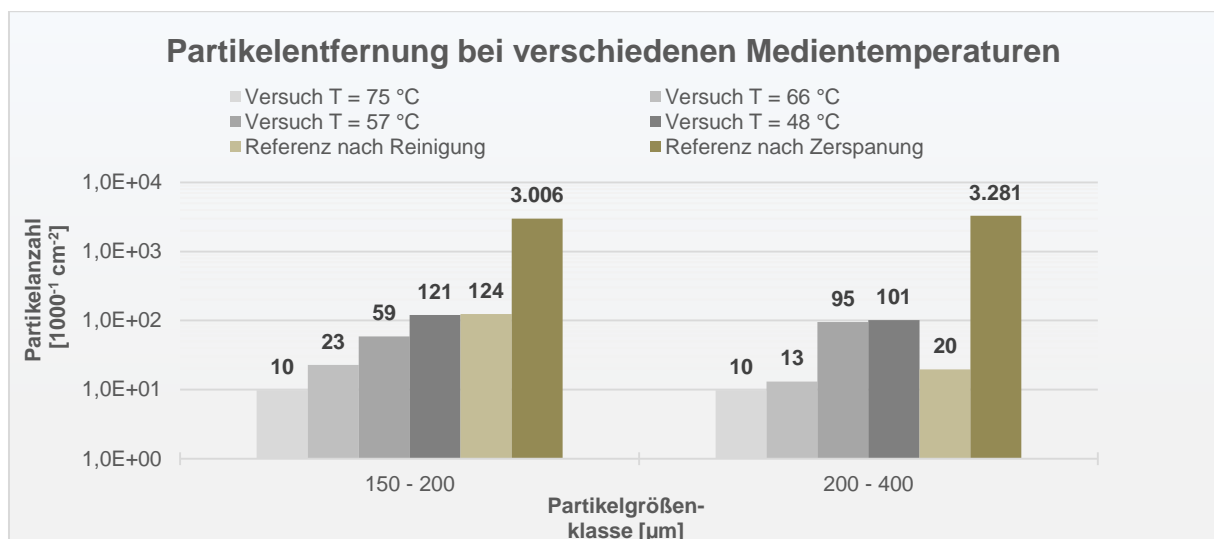


Abb. 7-6: Partikelanzahl in Abhängigkeit von verschiedenen Medientemperaturen ⁴²³

⁴²² Eigene Darstellung. Referenz bedeutet hier und im Folgenden die Originalfertigung des Herstellers.

⁴²³ Eigene Darstellung.

Die Analyse und Auswertung der Restschmutzanalysen führten zur Festlegung der Reinigungstemperatur auf 60 °C.⁴²⁴

7.1.3 Technische Beschreibung der Versuchsanlage

Bei der Reinigungsmaschine, die für die Untersuchungen in dieser Arbeit genutzt wurde, handelt es sich um eine Einkammeranlage für die wässrige Spritzreinigung, s. Foto in Abb. 7-7.



Abb. 7-7: Reinigungsmaschine⁴²⁵

Im Wesentlichen handelt es sich um eine Standardmaschine, die vom Hersteller in dieser Funktionalität Kunden angeboten wird. Davon abweichend sind einzelne Komponenten für die durchgeführten Versuche, prototypisch in die Anlage implementiert worden. Dazu zählt vor allem das für die Wärmeversorgung entwickelte Wärmeübertragungsmodul. Hierüber wird die Maschine über eine anlagenexterne Wärmequelle, mit der benötigten thermischen Energie versorgt. Für die Untersuchungen wurde ebenfalls eine umfangreiche Messtechnik implementiert, um alle relevanten Variablen der Energieflüsse zu erfassen. Die technischen Daten der Maschine sind dem Datenblatt im Anhang D.1 zu entnehmen

Die Anlage verfügt über verschiedene Spritzreinigungsprogramme, die auch einen Fluten der Reinigungskammer beinhaltet. Sowohl die Werkstückträger als auch der Düsenträger zu Medienzuführung in die Kammer sind rotatorisch bewegbar. Die Anlage verfügt über ein integriertes Trocknungsmodul zur Heißlufttrocknung, das zusätzlich mit Druckluft beaufschlagt werden kann. Die Gesamtmasse der in einem Reinigungszyklus behandelbaren Bauteile beträgt 100 kg.

⁴²⁴ Die Festlegung ist das Ergebnis eines Expertengesprächs mit Verfahrensingenieuren des Maschinenherstellers, Reinigungschemielieferanten und Experten für Nitrierwärmebehandlungsverfahren.

⁴²⁵ Eigene Darstellung. Bei der Maschine handelt es sich um das Modell JAVA der Firma MAFAC - E. Schwarz GmbH & Co. KG.

Das Wärmeübertragungsmodul baut auf zwei Koaxialwärmeübertragern auf, über die, mediensepariert und Hysterese geregelt, die Inhalte der zwei Medientanks erwärmt werden.⁴²⁶ Die Anlage beinhaltet eine automatisierte Chemiedosierung, bei der in Abhängigkeit der Reinigungszyklen, die verbrauchte Menge an Reinigungshilfsstoffen in die Medientanks gepumpt wird.

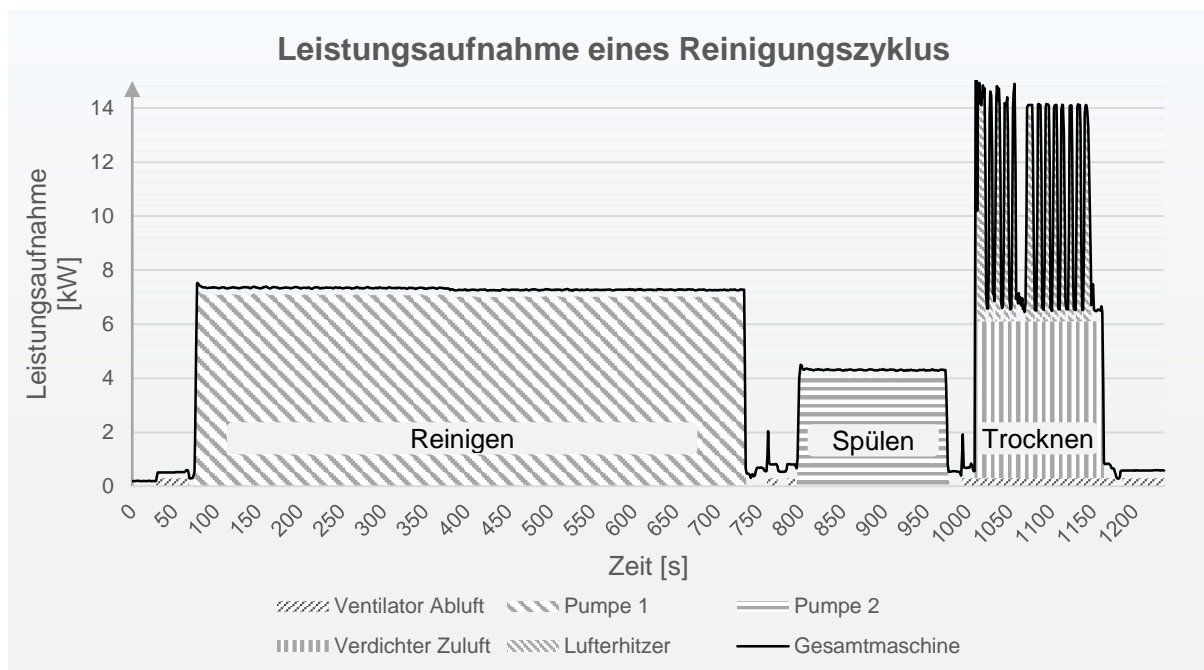
7.2 Ermittlung des Energiebedarfs der Reinigungsmaschine in der laufenden Produktion

7.2.1 Energiebedarf eines realen Reinigungsvorgangs

Die Beschreibung der Zustände der Verbrauchsgruppen vereinfacht eine Energiebedarfsanalyse, wenn an zentralen und übergeordneten Messpunkten die elektrische Leistungsaufnahme erhoben wird. In Abb. 7-8 ist der zeitliche Verlauf der Leistungsaufnahme über einen Reinigungszyklus abgebildet. Gemessen wurde am elektrischen Hauptanschluss der Maschine, sodass die einzelnen Verbrauchsgruppen und deren Komponenten kumuliert in die Darstellung einfließen. Das Diagramm zeigt ein prototypisches Reinigungsverfahren, bei dem zunächst die Hauptreinigungspumpe unterschiedliche Reinigungsprogramme abfährt. In diesem Fall ist ein einfaches Spritzreinigen mit anschließendem Spritzfluten der Reinigungskammer implementiert. In kurzen Nebenprogrammen werden mittels Druckluftimpulsen Wasseransammlungen aufgelöst und dem Medientank 1 während einer Abtropfphase wieder zugeführt. Damit wird eine Verschleppung von Verunreinigungen vermieden. Anschließend beginnt der Spülvorgang. Nach erneuten Nebenprozessen beginnt anschließend der Trocknungsvorgang. Der Seitenkanalverdichter sorgt für eine hohe Grundlast und das Heizregister schaltet zyklisch im Hysteresebetrieb, um die zugeführte Luft in der Reinigungskammer entsprechend zu temperieren.

Den Leistungsaufnahmen der beschriebenen Komponenten ist gemein, dass sie jeweils nur vom eingestellten Reinigungsprogramm abhängen. Somit kann das tatsächliche Lastprofil dieser Verbrauchsgruppen sehr gut beschrieben und prognostiziert werden. In diesem zeitlich-veränderlichen Leistungsverlauf ist die Tankheizung der Reinigungsmaschine nicht enthalten. Je nach Heizungsart ist sie dem instationären Nutzungsprofil zuzuordnen. Abhängig von der Art der Heizung ist entweder ein prozessabhängiger oder zyklischer Verbraucher.

⁴²⁶ Die Wärmeübertrager sind geeignet die Medienemulsionen inklusive der dispersen Anteil prozessstabil mit deutlich verringerter Fouling-Wirkung zu leiten, s. Junge et al. 2017, S. 574.

Abb. 7-8: Leistungsaufnahme einer Reinigungsmaschine über einen Reinigungszyklus⁴²⁷

Die elektrische Leistungsaufnahme des Hauptanschlusses kann durch Zuordnung zum entsprechenden Programm des Reinigungszyklus bereits wichtige Informationen liefern für die detaillierte thermodynamische Auswertung, s. Unterkapitel 6.2. Das Reinigungsprogramm der in Abb. 7-8 gezeigten Leistungsaufnahme lässt sich in Tab. 7-3 gezeigte Einzelschritte gliedern.

Die Spalten Nutzungsprofile und Steuervariable in Tab. 7-3 geben Informationen für eine energetische Modellierung der Verbrauchsgruppe. Konstantverbraucher können über die Steuervariable Dauer und den gemessenen elektrischen Verbrauch direkt in der Energiebilanz verrechnet werden. Prozessabhängige Sequenzen müssen durch mehrmalige Wiederholungsmessungen erfasst werden und können als durchschnittliche Leistungsaufnahmen in die Energiebilanz einfließen. Bei den zyklischen Verbrauchern können ebenfalls die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen nach ausreichender Zahl an Vergleichsmessungen herangezogen werden.

Tab. 7-3: Reinigungssequenzabfolge des beispielhaften Reinigungszyklus mit Angabe der tatsächlichen Dauer, der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme und dem Nutzungsprofil der Verbrauchsgruppe⁴²⁸

Bezeichnung Programmsequenz		Dauer [s]	Leistung [W]	Nutzungsprofil	Steuervariable
Reinigen	MT1 Spritzen	300	7322	Konstant	Dauer [s]
	MT1 Spritzfluten	358	7248	Konstant	Dauer [s]
Medium- wechsel	Nebenzeit	24	543	Prozessabhängig	
	Impulsblasen	12	811	Konstant	Dauer [s]

⁴²⁷ Eigene Darstellung. Die Messungen wurden durchgeführt mit einem Prototypen JAVA der Fa, MAFAC - E. Schwarz GmbH & Co. KG, Bj. 2014.

⁴²⁸ MT steht für Medientank

Bezeichnung Programmsequenz		Dauer [s]	Leistung [W]	Nutzungsprofil	Steuervariable
	Abtropfen	10	555	Konstant	Dauer [s]
	Absaugen	11	797	Konstant	Dauer [s]
Spülen	MT2 Spritzen	180	4245	Prozessabhängig	Dauer [s], Druck [mbar]
Wasser- nachlauf	Nebenzeit	15	668	Prozessabhängig	
	Absaugen	15	690	Konstant	Dauer [s]
Trocknen	Impulsheißblasen	60	10397	zyklisch	Dauer [s], Temperatur [°C]
	Heißblasen	93	10219	zyklisch	Dauer [s], Temperatur [°C]
Kammer- leerung	Nebenzeit	18	642	Prozessabhängig	
	Be- & Entladen	0			
Auswertung		Σ 1096	Ø 6318		

Die in der Tab. 7-3 in der rechten Spalte angegebenen Steuervariablen zeigen bereits die Abhängigkeit der jeweiligen Leistungsaufnahme für die in der Programmsequenz genutzten Aggregate. Bei der Hauptreinigung in Zeile 1-2 wird nur die Spritzpumpe des Medientanks 1 genutzt. Der Energiebedarf hängt nur von der eingestellten Reinigungsdauer ab, da es sich um einen Konstantverbraucher mit einer Leistungsaufnahme von ca. 6840 W handelt.

Variabel sind hingegen nur die Spritzdruckpumpe des zweiten Medientanks und die Aggregate der Trocknung. Deren jeweilige Leistungskurven sind in Abb. 7-9 dargestellt.

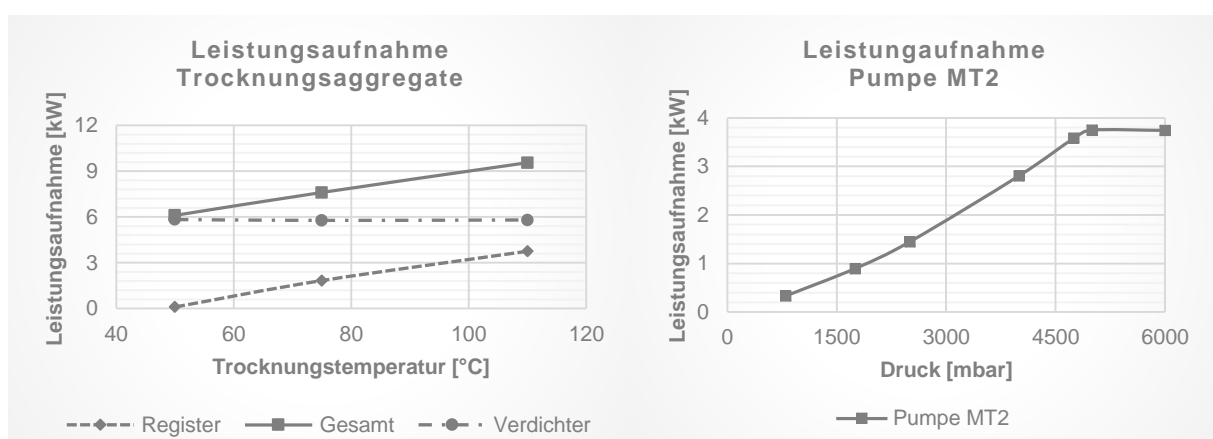


Abb. 7-9: Variable Leistungsaufnahme: Trocknungsaggregate Seitenkanalverdichter und Heizregister (li.); Spritzdruckpumpe des Medientanks 2 (re.)⁴²⁹

⁴²⁹ Eigene Darstellung.

Bei der Trocknung sind zwei Hauptaggregate in Betrieb: der Seitenkanalverdichter zur Beschleunigung der Trocknungsluft und das Heizregister, dass die Trocknungsluft auf die eingestellte Luft erwärmt. Das Register ist in diesem Fall auch der variable Verbraucher. Je höher sie Solltemperatur der Trocknung, desto häufiger schaltet das Register zu und steigert dadurch die Gesamtleistungsaufnahme. Die Leistungsaufnahme der Spritzdruckpumpe MT2 ist druckabhängig. Über eine PID-Regelung wird über einen Frequenzumrichter die Drehzahl des Antriebsmotors variiert. Durch die konstante Anlagenkennlinie stellt sich dadurch ein veränderter Druck und Volumenstrom der Pumpe ein.

Für die weiteren Auswertungen und die Energiebilanzierung nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik sei hier bereits auf die Auswertung in der letzten Zeile der Tab. 7-3 hingewiesen. Über eine Zykluszeit von etwa 1100 s wurde eine durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme von 6,3 kW gemessen.

Tab. 7-4: Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme für einen Reinigungszyklus

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme	W	6318	[W]	Betrieb ohne Bauteile

Vermisst man den elektrischen Leistungsbedarf über den Zeitraum von mehreren Produktionsschichten, wird sich der durchschnittliche Leistungsbedarf reduzieren. Je nach Auslastung der Produktion wird sich die Reinigungsmaschine in unterschiedlichen Betriebszuständen mit verschiedenen elektrischen Leistungsaufnahme befinden. Der zeitliche Verlauf einer Dauermessung über 10 Produktionsschichten à 8 Stunden ist in Abb. 7-10 dargestellt. Zur besseren Visualisierung ist ein Auszug über sechs Stunden der Produktion vergrößert ebenfalls in der Grafik vorhanden.

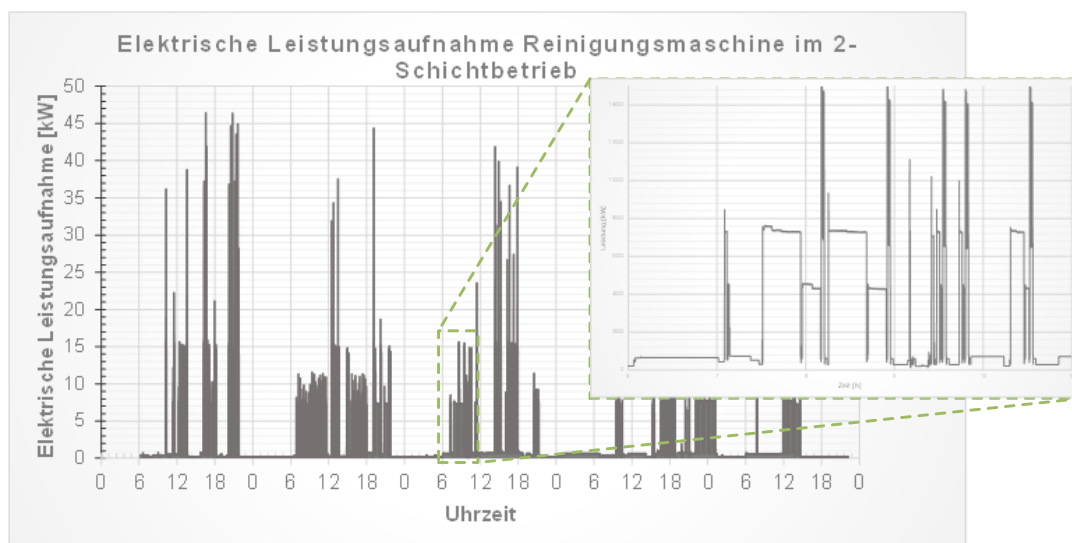


Abb. 7-10: Leistungsaufnahme einer Dauermessung der Reinigungsmaschine über 10 Produktionsschichten à 8 Stunden⁴³⁰

⁴³⁰ Eigene Darstellung.

Für diese durchgeführte Messreihe konnten die in Tab. 7-5 zusammengefassten Leistungsbedarfe für unterschiedliche Maschinenzustände identifiziert werden.

Tab. 7-5: Leistungsaufnahme bei verschiedenen energetischen Maschinenzuständen⁴³¹

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Working	P_{Op}	6318	[W]	s. Tab. 7-4; Abhängig jeweiligen Reinigungszyklus und Programmsequenz
Stand-By	P_{SB}	196	[W]	
Auslastung	A	26	[%]	432
Elektr. Leistungsaufnahme	P_{elek}	337	[W]	Ohne Wärmebedarf; 2 Schichten pro Tag

7.2.2 Ermittlung des Wärmebedarfs

Der Wärmebedarf der Reinigungsmaschine hängt zum einen von der Betriebstemperatur der Reinigungsmedien ab und zum anderen von der Auslastung der Maschine.⁴³³ Die Ermittlung des Wärmebedarfs kann über Messung der Energieflüsse der installierten Heizung erfolgen. In diesem Fall wird die Reinigungsmaschine direkt mit Wärme über Wärmeübertrager aus einem zentralen Versorgungssystem der Fabrik versorgt. Die Wärmeströme sind durch die entsprechende Messtechnik direkt erfassbar. Die Ergebnisse einer Messung sind in Abb. 7-11 dargestellt.

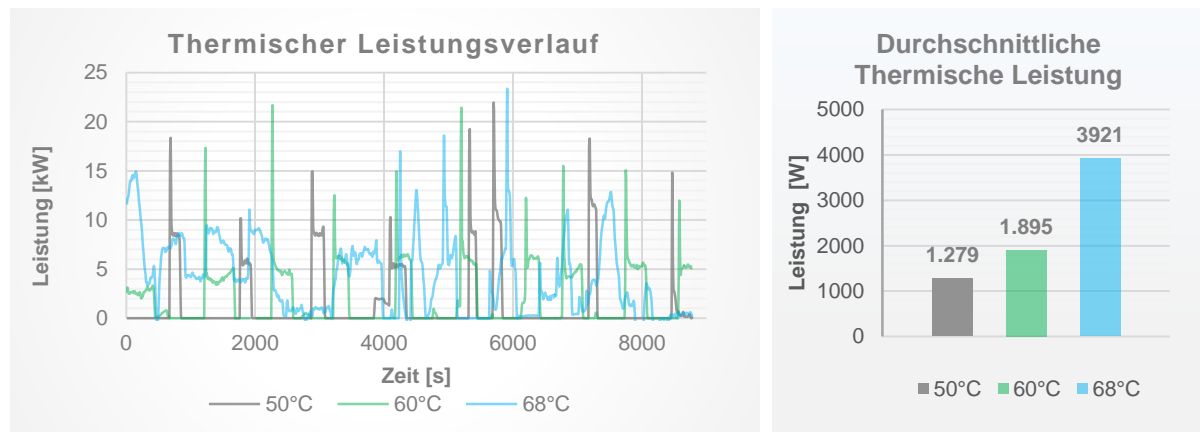


Abb. 7-11: Verlauf des Wärmestroms über den Wärmeübertrager in die Reinigungsmaschine (li.) und die berechneten durchschnittlichen thermischen Leistungen (re.) jeweils für ein Reinigungsprogramm bei 50 °C, 60 °C und 68 °C⁴³⁴

⁴³¹ Die verschiedenen Zustände orientieren sich am VDMA-Einheitsblatt VDMA 34179 Für Werkzeugmaschinen wurde hiermit eine Messvorschrift entwickelt, um Produktionsanlagen im laufenden Betrieb energetisch genauer analysieren zu können.

⁴³² Die hier erreichte Auslastung liegt etwa 10 % unter dem Auslastungsgrad in der realen Produktion der Referenzfertigung. Entsprechend kann hier skaliert werden.

⁴³³ Gilt für ansonsten gleichbleibende Randbedingungen, wie Wärmeisolation oder Umgebungstemperatur.

⁴³⁴ Eigene Darstellung. Das Reinigungsprogramm beinhaltet eine Reinigungsstufe, ein längeres Abtropfen und eine anschließende Trocknungsphase. Die Messungen wurden ohne Bauteile durchgeführt.

Dazu werden die Gesamtenthalpie nach Gleichung (6-22) über die Massenströme und die Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf des Wärmeübertrages bilanziert. Nach (6-10) gilt weiterhin $dH = dQ \Rightarrow d\dot{Q} = \dot{m}cdT$.⁴³⁵

Für die Ableitung des energetisch-realen Minimums und der damit einhergehenden Analyse des Wärmetransports ist es sinnvoll den Wärmeverlust für Haltebetrieb zu ermitteln. Dabei wird die Reinigungsmaschine im Stand-by-Modus⁴³⁶ gehalten, der über eine Hysterese-steuerung die Temperatur der Reinigungsmedien in einem Intervall von 1 K konstant hält. Die dabei benötigte thermische Leistung ergibt wichtige Informationen über den Wärmetransport der Maschine. Die Ergebnisse einer Messung für den Leistungsbedarf zum Halten der Temperatur von 60 °C ist in Abb. 7-12 dargestellt.

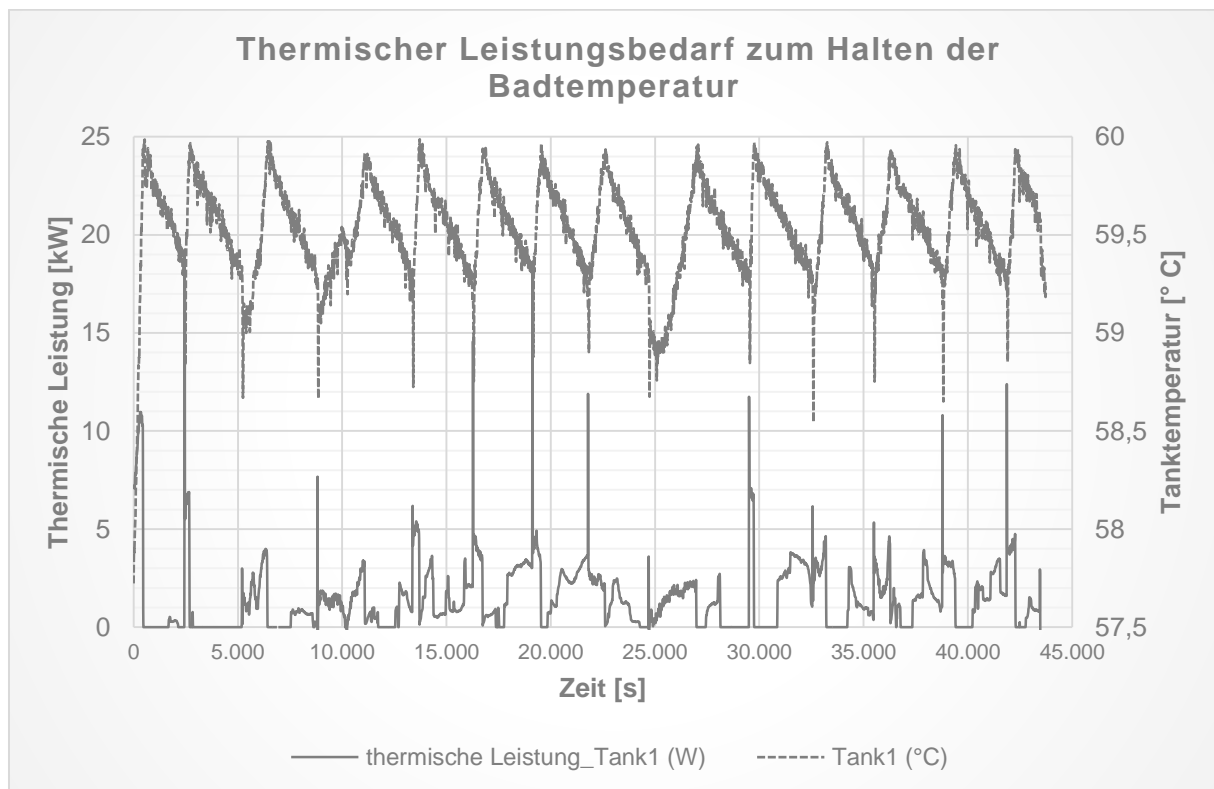


Abb. 7-12: Thermischer Leistungsbedarf zum Halten der Medientemperatur auf 60 °C beispielhaft für den Medientank 1⁴³⁷

Die Auswertung der Messungen für den Gesamtwärmestrom für den Haltebetrieb sind in Tab. 7-6 zusammengefasst.

⁴³⁵ Für eine elektrische Badheizung kann die nahezu vollständige Umsetzung der technischen Arbeit in Wärme angenommen werden. Somit kann über die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme und nach Gleichung (6-5) der Wärmebedarf berechnet werden.

⁴³⁶ S. VDMA-Einheitsblatt VDMA 34179, S. 5.

⁴³⁷ Eigene Darstellung.

Tab. 7-6: Wärmestrom für den Haltebetrieb der Reinigungsmedien auf 60 °C

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Wärmestrom Tank 1	$\dot{Q}_{H\ 60\ T\ 1}$	647	[W]
Wärmebedarf Tank 2	$\dot{Q}_{H\ 60\ T\ 2}$	689	[W]
Wärmestrom Halten	$\dot{Q}_{T\ 60}$	1336	[W]

Der Energiebedarf zur Erwärmung der Bauteile hängt von der Masse ab, der Ausgangstemperatur und ist proportional zur Wärmekapazität des Werkstoffs. Der Wärmebedarf kann wiederum über Gleichung (6-6) berechnet werden.

Tab. 7-7: Wärmebedarf der zu reinigenden Bauteile

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Masse der Bauteile	m_B	81	[kg]	Gesamtmasse inkl. Werkstückträger und Chargierkorb
Wärmekapazität	c	477	[J/(kg · K)]	Stahl
Temperaturdifferenz	$d\vartheta$	40	[K]	Umgebungstemperatur entspricht der Bauteiltemperatur ($\vartheta_U = 20\ ^\circ\text{C}$)
Wärmebedarf Bauteile	Q_B	1,55	(· 10⁶) [J]	

7.2.3 Parametrierung der Umgebungstemperatur als variable Einflussgröße

Bei der Messung und Bewertung des Energiebedarfs müssen mögliche Umwelteinflüsse entsprechend gewürdigt werden. Der wesentliche Einflussfaktor für den Wärmebedarf der Reinigungsmaschine im Betrieb besteht in die Veränderung der Umgebungstemperatur.

Für die Ermittlung der Einflussgröße Umgebungstemperatur wurde umfangreiche Zeitreihen im Betrieb der Reinigungsmaschine ausgewertet. Dabei wurde für gemittelte Zeitreihen von 300 s die thermische Leistung gemessen, die über die Wärmeübertrager in die Maschine eingebracht wurde. Die Auswertung wurde für den Zeitraum von einem Jahr vorgenommen.⁴³⁸ Da die benötigte thermische Leistung von vielen Variablen abhängt, kann eine einfache funktionsabhängige Zuweisung der Raumtemperatur zum Wärmebedarf keine definitive Aussage liefern. Deswegen wurde die Abhängigkeit des Wärmebedarfs von der Umgebungstemperatur durch die Bildung von Kovariablen untersucht.⁴³⁹

⁴³⁸ Die Auswertung wurden mittels einem Systemidentifikationstool in der KNIME Analytics Platform durchgeführt. Anhand der Messdaten wurde durch ein polynomiales Regressionsmodell zehnten Grades eine analytische Funktionsabhängigkeit berechnet. Der Aufbau und Funktionsweise ist im Anhang D.8.

⁴³⁹ Für weiterführende und vertiefende Studien wird auf Sekundärliteratur verwiesen, zum Beispiel Olejnik und Algina 1985.

Für die erste Untersuchung wurde die thermische Leistung in Abhängigkeit der Raumtemperatur untersucht. Als Kovariable wurde zunächst die Medientemperatur betrachtet. Das berechnete Flächenpolynom zur Raumtemperatur und Tanktemperatur ist in Abb. 7-13 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die höchsten thermischen Leistungen im Bereich niedriger Raumtemperaturen und geringer Tanktemperaturen auftreten. Zu analysieren sind vor allem die Isothermen der Tanktemperatur. Hierbei zeigt sich eine stetig fallende Kurve hin zu höheren Raumtemperaturen.

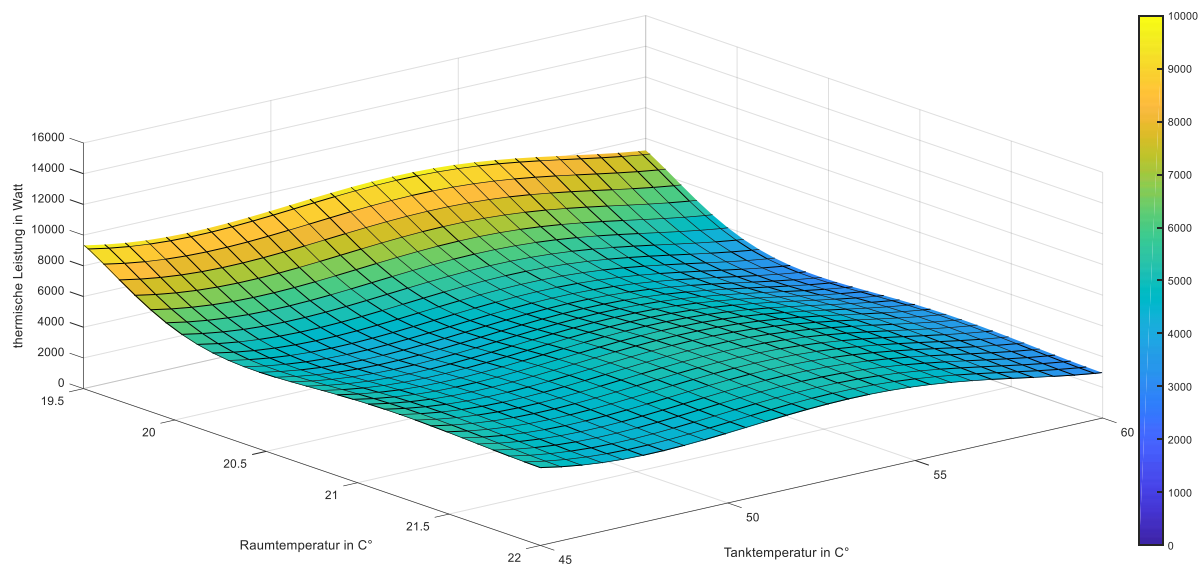


Abb. 7-13: Polynomialfläche anhand der gemessenen Tanktemperatur und Raumtemperatur als Ergebnis einer polynominalen Regression zehnten Grades⁴⁴⁰

Als nächste Kovariable wurde die elektrische Leistungsaufnahme der Reinigungsmaschine für die Berechnung einer Polynominalfläche der thermischen Leistung gesetzt. Das Ergebnis gibt die Abb. 7-14 wieder.

⁴⁴⁰ Eigene Darstellung.

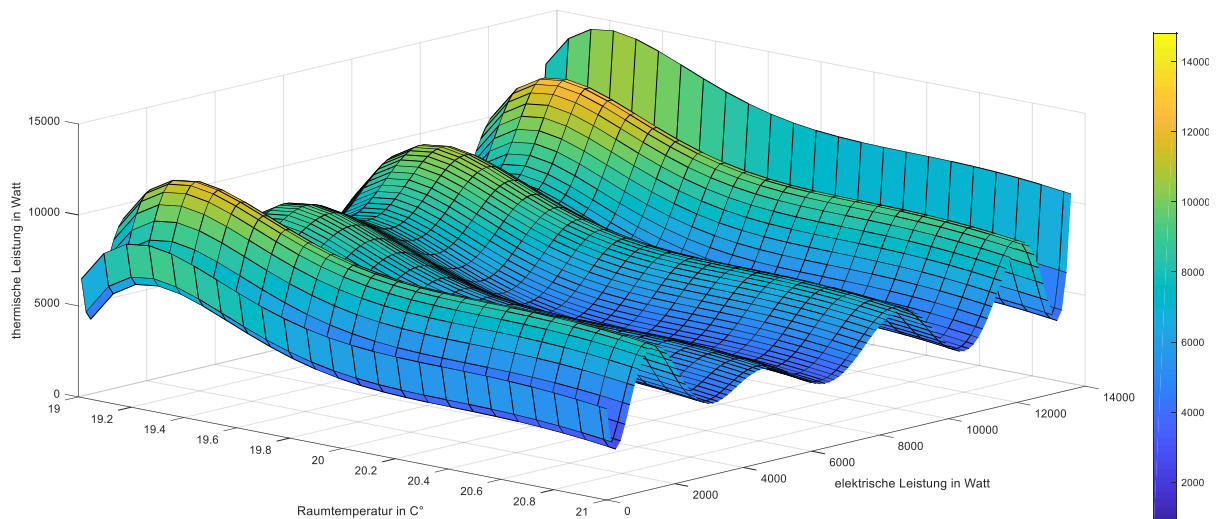


Abb. 7-14: Polynomialfläche anhand der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme und Raumtemperatur als Ergebnis einer polynomialen Regression zehnten Grades⁴⁴¹

Bei dieser Polynomialfläche fällt der wellenförmige Charakter auf. Dieser rührt aus den verschiedenen Häufigkeiten der durchschnittlichen elektrischen Leistungsaufnahmen. Die verschiedenen Konstantverbraucher, s. Abb. 6-14, und deren Leistungsaufnahme führen zu einer vermehrt auftretenden Leistungsaufnahme in diesen Bereichen. Da die Auswertung über selbstlernende Algorithmen erfolgt, die auf Basis vorhandener Messzustände funktionale Zusammenhänge abbilden, ist in diesen Bereichen ebenfalls häufiger die Versorgung mit thermischer Energie zu finden. Wie bereits bei der Korrelation mit der Tanktemperatur, kann auch mit der Kovariable elektrische Leistung eine inverse Proportionalität des thermischen Leistungsbedarfs zur Raumtemperatur gefunden werden.

Als weitere Untersuchung wurde auch die Abhängigkeit der thermischen Leistungsaufnahme zur Raumtemperatur unter Einbeziehung der Versorgungsnetztemperatur durchgeführt. Dies ist im Falle der Versuchsmaschine notwendig, da die Wärmeversorgung über eine externe Quelle eines Zentralnetzes erfolgt. Der Energieträger ist dabei ein Warmwassernetz. Die übertragene thermische Leistung hängt dabei in großem Maße davon, welche mittlere logarithmische Temperaturdifferenz zwischen der Vorlauftemperatur in den Wärmeübertrager und der Medientemperatur der Reinigungsmaschine herrscht. Die errechnete Polynomialfläche ist in Abb. 7-15 dargestellt.

⁴⁴¹ Eigene Darstellung.

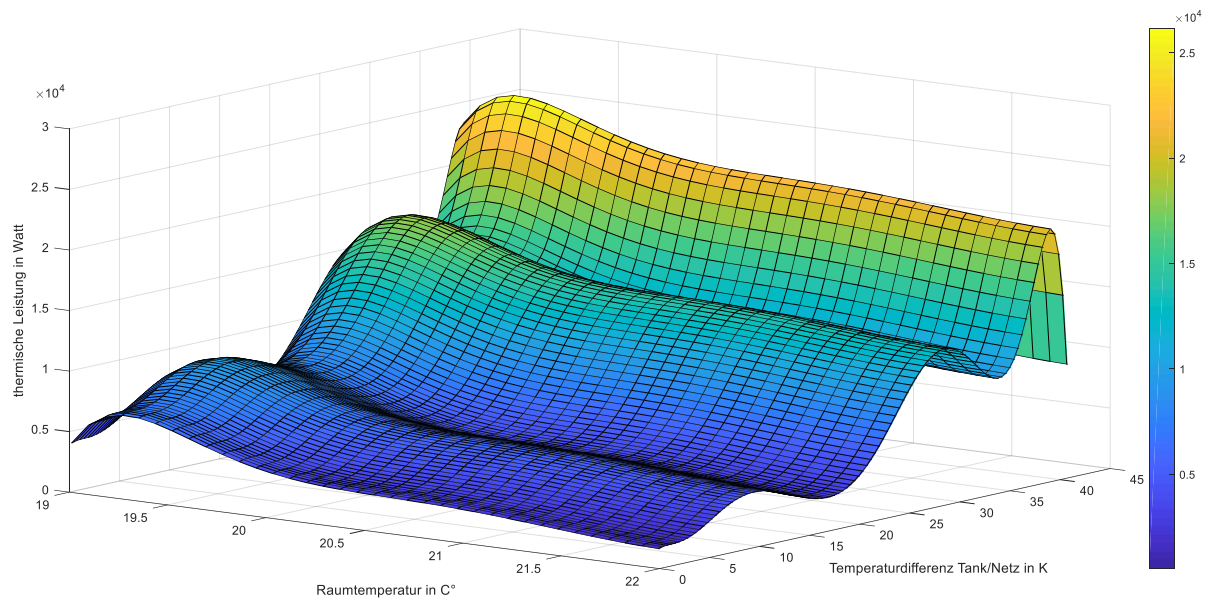


Abb. 7-15: Polynomialfläche anhand der gemessenen Temperaturdifferenz zwischen Versorgungsnetz- und Tanktemperatur und Raumtemperatur als Ergebnis einer polynomialen Regression zehnten Grades⁴⁴²

Auch hierbei ist wiederum eine wellenförmige Struktur erkennbar. Ebenso ist dies auf die Häufigkeit der eintretenden Zustände zurückzuführen. Der Kurvenverlauf zeigt jedoch sehr deutlich einen geringeren Wärmebedarf bei höheren Raumtemperaturen.

7.2.4 Energieeffizienz der Reinigungsanlage in der Produktion

Aus den vorigen Kapiteln ergeben sich die einzelnen Energietерme, die das EBM bilden. Dies ist die technische Arbeit in Form von elektrischer Energie, die abhängig ist, vom gewählten Reinigungsprogramm. Der Wärmebedarf ergibt sich als Summe aus den Wärmeverlusten bei gegebener Solltemperatur und der Wärmestrom zum Ausgleich der Bauteiltemperatur und Medientemperatur. Summiert für den betrachteten Reinigungsprozess ergibt dies die in angegebenen Werte.

Tab. 7-8: Berechnung des EBM

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Elektrischer Energiebedarf	E_W	6,95	($\cdot 10^6$) [J]	Reinigungszyklus von 1100 s
Wärmebedarf	E_Q	3,02	($\cdot 10^6$) [J]	Bezogen auf eine Temperatur von 60 °C und 180 Bauteile
Energiebedarf der Messung	EBM	9,97	($\cdot 10^6$) [J]	

⁴⁴² Eigene Darstellung.

Der EBM ist die für einen Reinigungszyklus aufzuwendende Energie. Dieser Wert ist skalierbar für jeden durchgeführten Reinigungszyklus. Da bei der Versuchsmaschine die Wärmeversorgung über ein separates System erfolgt, ist bei einem gewählten Reinigungsprogramm keine Variation in der elektrischen Leistungsaufnahme vorhanden.⁴⁴³

Der Wärmebedarf ist bei ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen ein Skalar der Bauteilmasse. Für eine beispielhafte Produktion sind der Verlauf des Energiebedarfs und die Summenverlaufskurve in Abb. 7-16 dargestellt.

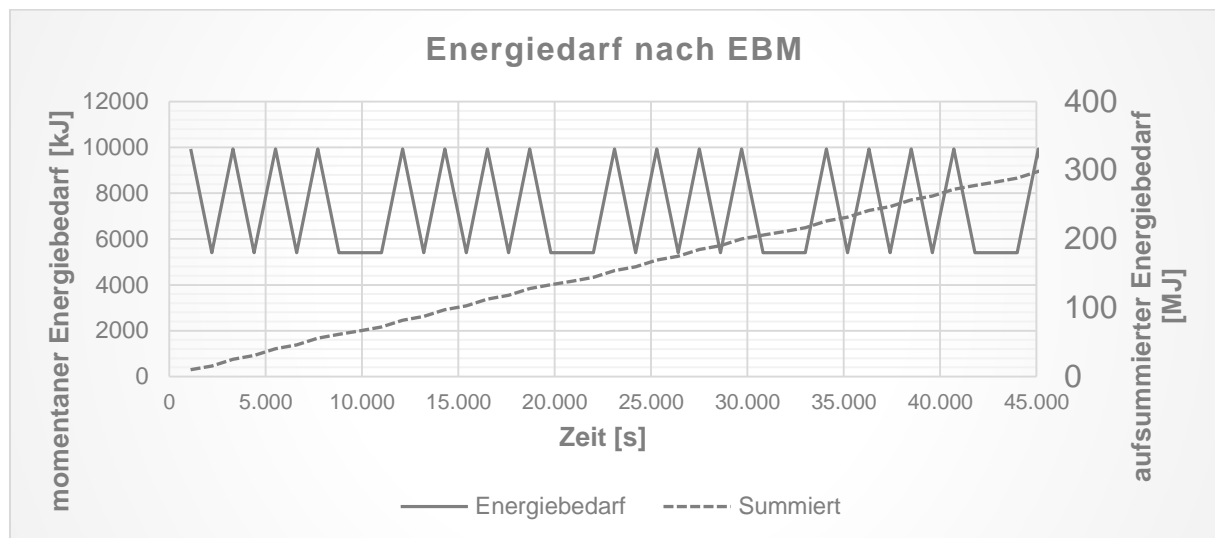


Abb. 7-16: Energiebedarf der Reinigungsmaschine in einer Produktion mit einer Auslastung von 40 %; der momentane Energiebedarf hat die zeitliche Auflösung eines Reinigungszyklus von 1100 s⁴⁴⁴

7.3 Ableitung des energetisch-realen Minimums

7.3.1 Analyse und Bewertung der Energieflüsse in der Reinigungsmaschine

Anhand der in Unterkapitel 6.2 hergeleiteten Methode zur Erfassung der Energieflüsse in der Reinigungsmaschine, sollen die Ergebnisse der Energiebilanz nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik nun präsentiert werden. Es ist dabei nach dem Ablaufschema, wie es in Abb. 6-5 dargestellt ist, verfahren worden.

Das Ergebnis der Messung der technischen Arbeit in Form von elektrischer Energie, die während eines Reinigungszyklus über die Systemgrenze einfließen, sind im vorigen Unterkapitel 7.2 mit der Abb. 7-8 und der Tab. 7-3 bereits zusammenfassend dargestellt und erläutert worden. Der erste Term dW der Bilanzgleichung (6-10) ist somit bereits ermittelt. Es folgen jetzt die Erläuterungen zur Ermittlung der Wärmetransportvorgänge und der an Masse gebundenen Energien.

Basis aller Analysen stellt ist die oben beschriebene Reinigungsmaschine, s. 7.1.3. Es wurden alle Messungen und Datenauswertungen für ein eingeschwungenes System, das heißt, ein System im thermodynamischen Gleichgewicht durchgeführt. Dafür wurden lange Versuchszyklen über mehrere Stunden und wiederholt an mehreren Tagen unternommen.

⁴⁴³ Die geringen Betriebspunktverschiebungen der luftführenden Aggregate, wie Seitenkanalverdichter und Abluftgebläse, in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur können vernachlässigt werden.

⁴⁴⁴ Eigene Darstellung.

Bilanzsumme des Wärmetransports

In Tab. 7-9 sind die Randbedingungen der Analyse aufgelistet, die für die weiteren Berechnungen der Bilanzierung erforderlich sind.

Tab. 7-9: Parameter als Randbedingungen der Analyse

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Umgebungsbedingungen				
Umgebungstemperatur	ϑ_U	27,4	[°C]	
rel. Luftfeuchtigkeit Umgebung	φ_U	0,51	[-]	
Abmaße RM				
Breite RM	a_{RM}	1,5	[m]	
Tiefe RM	b_{RM}	1,7	[m]	
Höhe RM	c_{RM}	2,05	[m]	
Volumen Reinigungskammer	V_{RM}	0,44	[m³]	
Programmvorgaben				
Tanktemperatur	ϑ_{MT}	60	[°C]	
Temperatur Heißblasen	ϑ_{Tr}	110	[°C]	

Die Bestimmung der Wärmeleitung erfolgt nach Gleichung (6-11). Die Messdaten und Berechnungsgrößen sind im Anhang in Tab. 8-1 aufgeführt und ergeben den Wärmetransport in Form von Wärmeleitung, s. Tab. 7-10.

Tab. 7-10: Wärmeleistung durch Wärmeleitung

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Wärmeleistung Leitung	\dot{Q}_{WL}	-12,01	W

Die Ermittlung des Wärmetransports durch Konvektion erfolgt nach Gleichung (6-12) für jede Maschineseite außer der Unterseite. Der konvektive Wärmetransport bildet sich dann als Summe aller Einzelteile der Maschinenseiten. Die Ermittlung der Temperaturen der Maschinenseitenoberflächen wurde mit einer Thermografiekamera durchgeführt.⁴⁴⁵ Es wurde mit einer Bildbearbeitungs-Software eine durchschnittliche Oberflächentemperatur bestimmt.⁴⁴⁶ Der Wärmestrom durch Konvektion ergibt sich dadurch zu dem in Tab. 7-11 angegebenen Wert.

⁴⁴⁵ Die Messfehler wurden minimiert, indem 41 Messpunkte auf der Maschinenoberfläche mittels Infrarotthermometer und Thermoelement kalibriert wurden. Der Messstellenplan findet sich im Anhang D.3.

⁴⁴⁶ Verwendet wurde die freiverfügbare FLIR Tools-Software© (<https://www.flir.de/products/flir-tools/>).

Tab. 7-11: Wärmeleistung durch konvektiven Wärmetransport⁴⁴⁷

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Wärmeleistung Konvektion	\dot{Q}_K	-321,5	W

Zur vollständigen Beschreibung der Wärmetransportvorgänge folgt die Berechnung der Wärmestrahlung. Nach Gleichung (6-17) und dem beschriebenen Zonenmodell wird der Strahlungsaustausch jeder Maschinenseite mit den Raumflächen in der Fabrik bestimmt und aufsummiert. Das Ergebnis ist in Tab. 7-12 zusammengefasst.

Tab. 7-12: Wärmeleistung durch Strahlungsaustausch

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Wärmeleistung Strahlung	\dot{Q}_S	-1828,1	W

Enthalpien

Für die Berechnung der Enthalpien müssen die einzelnen Programmsequenzen für sich untersucht werden. Je nach Programm schalten unterschiedliche Aggregate und sorgen für Massenströme an feuchter Luft in oder aus der Reinigungsmaschine. Die einzelnen Enthalpien lassen sich nach Gleichung (6-23) berechnen. Eine ausführliche Darstellung ist im Anhang D.4.2 enthalten.

Tab. 7-13: Enthalpiebilanz über einen Reinigungszyklus

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Enthalpiebilanz	H	-2,97	($\cdot 10^6$) J

Energiebilanz der Reinigungsmaschine

Tab. 7-14: Energiebilanz der Reinigungsmaschine aufgeschlüsselt für jede Programmsequenz; alle Angaben in J

Energien [J]	dE=	dW +	dQ +	dH
MT1 Spritzen	847.669,7	2.121.609,1	-694.898,6	0,0
MT1 Spritzfluten	1.011.552,5	2.505.217,8	-829.245,6	0,0
Nebenzeit	0,0	7.038,0	-55.591,9	0,0
Impulsblasen	0,0	6.730,0	-27.795,9	-180.006,4
Abtropfen	0,0	3.049,6	-23.163,3	0,0
Absaugen	0,0	6.016,8	-25.479,6	-70.785,6
MT2 Spritzen	0,0	719.106,4	-416.939,1	0,0
Nebenzeit	0,0	6.269,3	-34.744,9	0,0

⁴⁴⁷ Die Berechnung der konvektiven Wärmeströme der einzelnen Seitenfläche der Maschine sind in Anhang D.2.4 zusammengefasst.

Energien [J]	dE=	dW +	dQ +	dH
Absaugen	0,0	6.596,1	-34.744,9	-96.525,9
Impulsheißblasen	0,0	608.817,5	-138.979,7	-958.767,6
Heißblasen	0,0	927.071,3	-215.418,6	-717.251,7
Nebenzeit	0,0	7.044,5	-41.693,9	-115.831,0
Be- & Entladen	-2.016,1	0,0	0,0	-828.071,4
Bilanzsumme	1.857.206,2	6.924.566,4	-2.538.696,2	-2.967.239,6
[kWh]	0,574	1,923	-0,702	-0,824

Analog zu Abschnitt 6.2.3 können die Energieflüsse über einen Reinigungszyklus hinweg für die Systemgrenze Reinigungsmaschine aufgestellt werden. In Abb. 7-17 ist die Bilanz dargestellt.

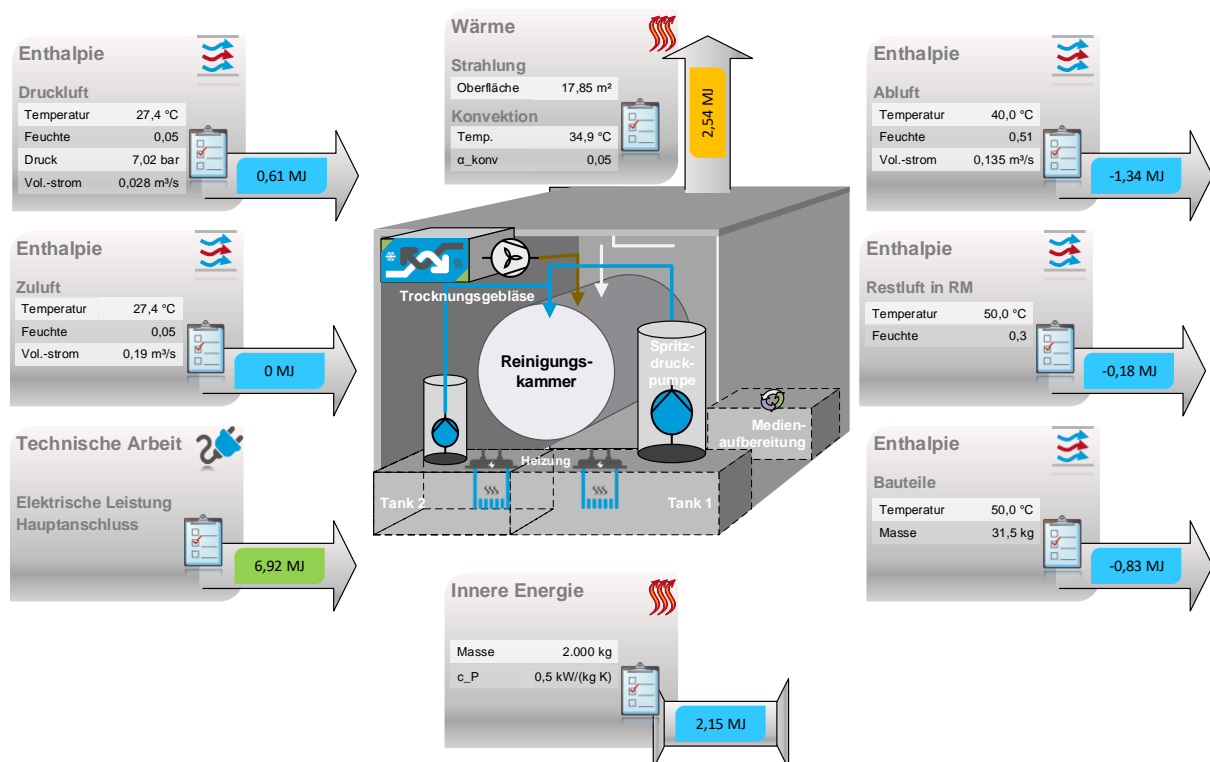


Abb. 7-17: Energieflüsse in Form der verschiedenen Energietерme technische Arbeit, Wärme und Enthalpie⁴⁴⁸

Auffallend ist die Steigerung der inneren Energie über einen Reinigungszyklus. Dies ist damit begründet, dass ein hoher Teil der hydrodynamischen Energie der Pumpe in das Reinigungsfluid dissipiert und dadurch zu einer Temperaturerhöhung führt. Dies sorgt dafür, dass bei ausreichend langer Einsatzzeit der Spritzpumpe, bei gleichzeitigem geringem Wärmebedarf durch die eingebrachten Bauteile, kein zusätzlicher Wärmebedarf während eines dauerhaften Betriebs nötig ist.

⁴⁴⁸ Eigene Darstellung.

Wird die Energiebilanz nach dem ersten Hauptsatz über einen Reinigungszyklus nach den negativ gerichteten Anteilen ausgewertet, ergibt sich eine anteilige Verteilung, wie sie in Abb. 7-18 dargestellt ist.

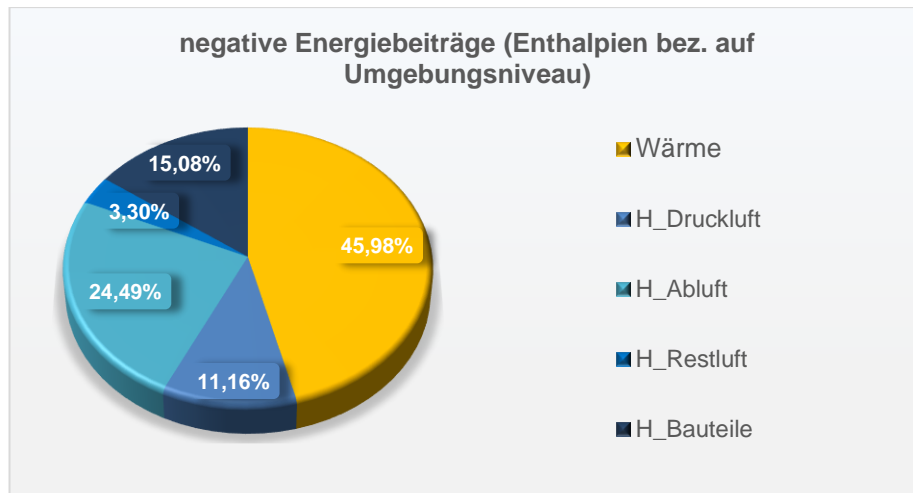


Abb. 7-18: Verteilung der negativen Energieflüsse über die Systemgrenze⁴⁴⁹

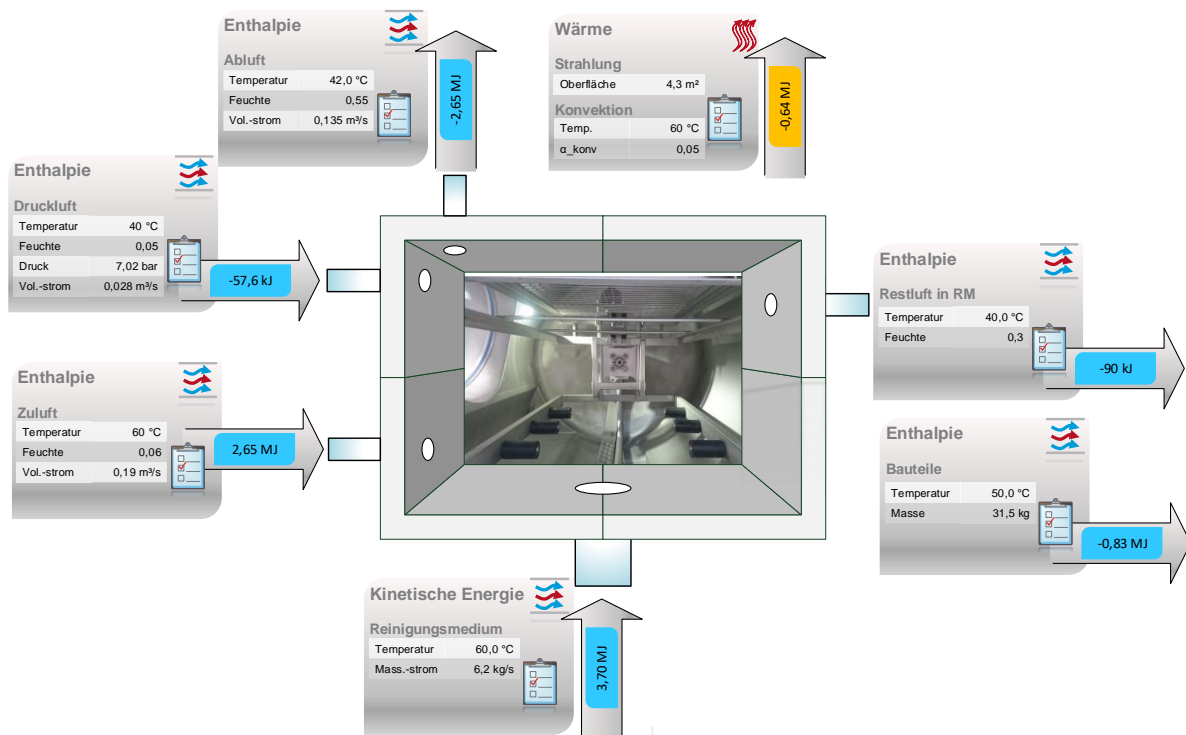
Es ist zu erkennen, dass mit 46 % die Wärmetransporte für die größten Energieflüsse über die Systemgrenze Reinigungsmaschine darstellen. Durch die hohen Enthalpiebeträge der feuchten Abluft fließen mit knapp 25 % ebenfalls große Mengen an aufgewendeter Energie wieder ab.

Energiebilanz der Reinigungskammer

Eine entscheidende Untersuchung zur Berechnung des ETM ist die Energiebilanzierung der Reinigungskammer. Mit der Bilanzdifferenz aus Reinigungsmaschine und der –kammer lassen sich Energieanteile ermitteln, die für den Produktionsbetrieb erforderlich sind, aber an der eigentlichen Reinigungsaufgabe nicht beteiligt sind.

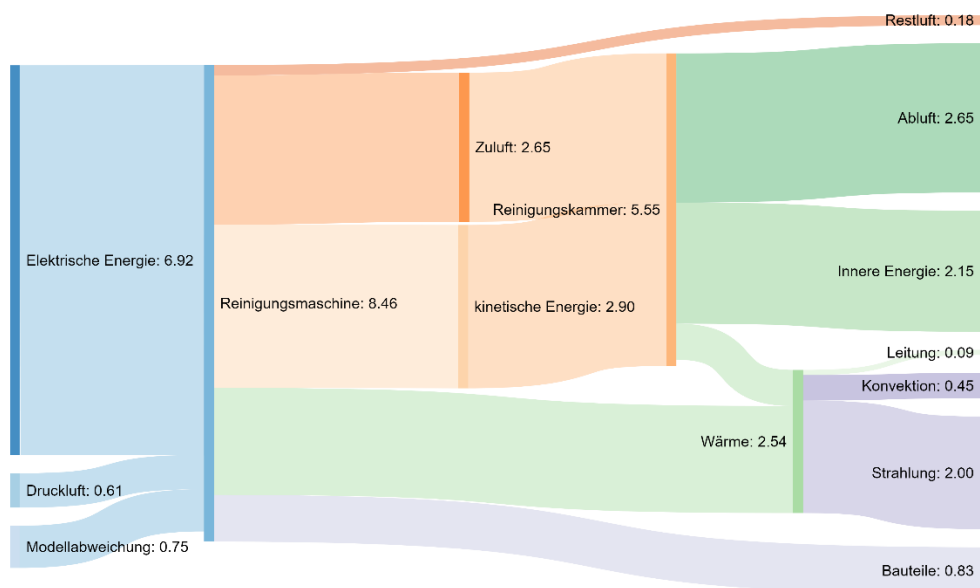
Die Bilanz für die Reinigungskammer selbst ist nach Abschnitt 6.2.4 ermittelt. Das Ergebnis ist in Abb. 7-19 dargestellt.

⁴⁴⁹ Eigene Darstellung.

Abb. 7-19: Bilanz der Energieflüsse über die Systemgrenze der Reinigungskammer⁴⁵⁰

Der mit Abstand größte Energiefluss passiert die Reinigungskammer als kinetische Energie des Reinigungsmediums. Ein Großteil dieser Energie muss nach dem Reinigen durch eine geführte Verdunstung im Trocknungsprozess wieder aus der Kammer geführt werden.

Eine übersichtliche Darstellung der Energieflüsse und –wandlungen innerhalb der Reinigungsmaschine ist durch ein Sankey-Diagramm möglich. Für die durchgeführte Energiebilanz ist dieses Diagramm in Abb. 7-20 dargestellt.

Abb. 7-20: Sankey-Diagramm der Energieflüsse über die Systemgrenze Reinigungsmaschine⁴⁵¹⁴⁵⁰ Eigene Darstellung.⁴⁵¹ Eigene Darstellung.

7.3.2 Energieeffizienz der Reinigungsmaschine - EEV_R

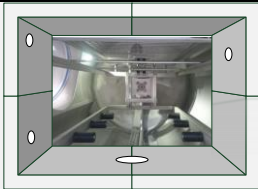
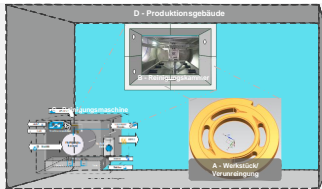
Die Berechnung des EEV_R kann über den Vergleich der Bilanzen der Reinigungskammer und der Reinigungsmaschine erfolgen. Aus dem Vergleich der Bilanzsummen der Reinigungsmaschine und der Reinigungskammer lässt sich der Anteil der Energie ableiten, der mit dem Reinigungsgut nicht in Verbindung steht, s. Tab. 7-15.

Tab. 7-15: Berechnung der Differenz aus den Energiebilanzen für Reinigungsmaschine und -kammer

Parameter	Wert	Einheit	Bemerkung
Bilanzsumme Reinigungsmaschine	8,11	($\cdot 10^6$) [J]	
Bilanzsumme Reinigungskammer	6,02	($\cdot 10^6$) [J]	
Energieflüsse ohne Ein-/Austritt der Bilanzgrenze Reinigungskammer	2,09	($\cdot 10^6$) [J]	

Die Differenz zwischen den Bilanzen ergibt, dass etwa 26 % der Energie in der Reinigungsmaschine keinen Anteil an der Energiebilanz der Reinigungskammer besitzen. Mit diesen Ergebnissen aus der Energiebilanzen lässt sich die Energieeffizienz der Reinigungsanlage EEV_R berechnen. Wie in Abschnitt 3.3.3 definiert, ergibt er sich als Verhältniswert zwischen ERM und EBM. Das energetisch-reale Minimum stellt dabei gerade die Bilanzsumme der Reinigungskammer dar. Das Ergebnis ist in Tab. 7-16 berechnet.

Tab. 7-16: Berechnung der Energieeffizienz der Produktionsanlage EEV_R

Energetische Minima	Wert	Einheit	Energieeffizienz
ERM 	6,02	($\cdot 10^6$) [J]	
$EEV_R = 0,605$			
EBM 	9,97	($\cdot 10^6$) [J]	

Der Energieeffizienzwert der Reinigungsanlage EEV_R ergibt sich zu 0,605. Das heißt, etwa 40 % der gemessenen Energie ist für den Produktionsbetrieb der Maschine verantwortlich. Dies umfasst den Wärmeaustausch mit der Umgebung und die Energiebeträge von Aggregaten, die nicht mit der Reinigungskammer in Verbindung stehen.

7.4 Analyse des energetisch-technischen Minimums

7.4.1 Kinetische Energie des Reinigungsmediums auf dem Bauteil

Das energetisch-technische Minimum der Spritzreinigung der Versuchsanlage kann ermittelt werden über die Volumenströme der Fluidzuführung und der –beschleunigung über die Düseneinströmung in die Reinigungskammer. Die verfügbare kinetische Energie hängt dann von der Bauteilgeometrie und insbesondere der überströmten Fläche pro umgelenkten Freistrah, s. Abschnitt 5.4.2.

Wie bei der technischen Beschreibung genannt, erfolgt die Fluidzuführung über 54 Einstrahldüsen, s. Abb. 7-21.



Abb. 7-21: Aufnahme der Reinigungskammer und Medienzuführung (li.) mit den Einstrahldüsen (re.)⁴⁵²

Der bewegte Volumenstrom kann über das Kennfeld der Spritzdruckpumpe abgelesen werden, s. Anhang D.7. Die Parameter zur Berechnung der kinetischen Energie und der Fluidgeschwindigkeit auf dem Bauteil sind in zusammengefasst.

Tab. 7-17: Berechnungsparameter für die kinetische Energie des Fluidstroms

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Pumpenvolumenstrom	\dot{V}_p	321	[l/min]	Spritzdruckpumpe MT1
Länge Rotationsarm Medienzuführung	l_M	0,3	[m]	
Anzahl Düsen	N_D	54	[-]	
Düsendurchmesser	D_0	1,65	$(\cdot 10^{-3})$ [m]	Definiert als Freistrahldurchmesser d_s ; $(l_M/D_0 \cong 188)$ ⁴⁵³
Maximaler Abstand zwischen zwei Düsen	l_d	3,5	$(\cdot 10^{-3})$ [m]	

⁴⁵² Eigene Aufnahme.

⁴⁵³ S. Abschnitt 5.3.2

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Dichte Fluid	ρ_F	997,05	[kg/m ³]	Wasser (20 °C) ⁴⁵⁴
Dichte Partikel	ρ_P	7762	[kg/m ³]	Stahl 1.8524 ⁴⁵⁵
Erdbeschleunigung	g	9,81	[m/s ²]	⁴⁵⁶
Dynamische Viskosität	η	890,02	($\cdot 10^{-6}$) [Pa \cdot s]	⁴⁵⁷

Mit den Parameterwerten kann nach der in 5.3.1 hergeleiteten Methode die maximale Fluidgeschwindigkeit und kinetische Energie des umgelenkten Freistrahls berechnet werden.

Tab. 7-18: Berechnung der Strömungsbedingungen im Freistrah und auf dem Bauteil

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Volumenstrom pro Düse	\dot{V}_D	5,94	[l/min]	
Freistrahgeschwindigkeit	v_F	46,33	[m/s]	
Reynolds-Zahl des Freistrahls	Re_d	76147	[-]	Nach Gleichung (5-10)
Radius der Grenzschichtausbildung	r_m	3,68	($\cdot 10^{-3}$) [m]	Nach Gleichung (5-19)
Radius der ausgebildeten Grenzschicht	r_0	1,24	($\cdot 10^{-2}$) [m]	Nach Gleichung (5-22)
Höhe des Flüssigkeitsfilms	$h_f (r=r_0)$	4,39	($\cdot 10^{-5}$) [m]	Nach Gleichung (5-23)
Radius der sich ausbildenden Turbulenz	r_t	1,72	($\cdot 10^{-2}$) [m]	Nach Gleichung (5-24)
Radius der ausgebildeten Turbulenz	r_h	2,26	($\cdot 10^{-2}$) [m]	Nach Gleichung (5-25)
Fluidgeschwindigkeit auf Spiegeloberfläche	$v_F(r = r_t)$	37,30	[m/s]	Nach Gleichung (5-23)
Fluidgeschwindigkeit auf Spiegeloberfläche	$v_F(r = \frac{l_d}{2})$	36,75	[m/s]	Nach Gleichung (5-23)
Fluidgeschwindigkeit auf Spiegeloberfläche	$v_F(r = r_h)$	10,60	[m/s]	Nach Gleichung (5-26)
Fluidgeschwindigkeit ($z=d_P/2$)	$v_F(r = \frac{l_d}{2})$	1,97	[m/s]	Nach Gleichung (5-21) ⁴⁵⁸

Mit den berechneten Variablen zur Beschreibung der Strömungsverhältnisse kann die Abnahme der kinetischen Energie über den Radius der Bauteiloberfläche bestimmt werden. Der Zusammenhang ist in Abb. 7-22 dargestellt.

⁴⁵⁴ S. VDI e.V. 2013, S. 176

⁴⁵⁵ Datenblattangabe.

⁴⁵⁶ S. Fußnote 210.

⁴⁵⁷ S. Fußnote 210.

⁴⁵⁸ Die Geschwindigkeit bezieht sich auf den Partikel mit der größten Mindestgeschwindigkeit zum Lösen der Bindungsenergien. Die Analyse dazu findet im nächsten Kapitel 0 statt. Der Wert z ist der halbe Durchmesser dieses Partikels

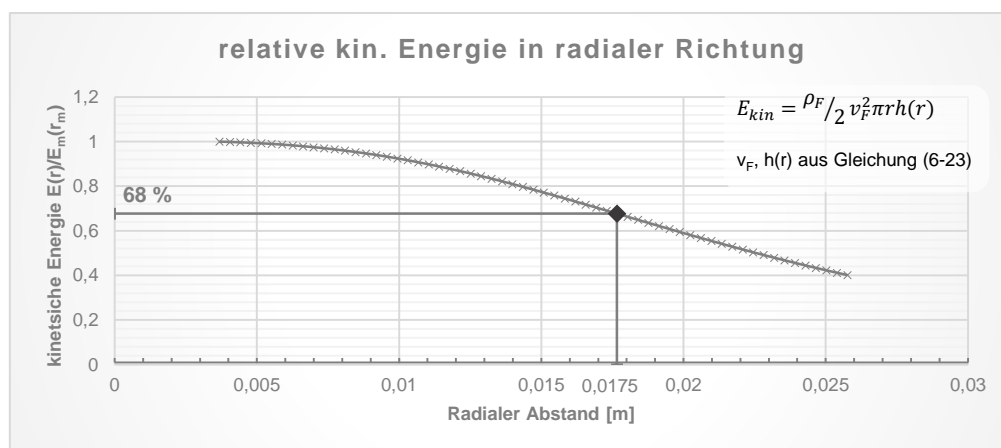


Abb. 7-22: Abnahme der kinetischen Energie über den radialen Abstand auf der Bauteiloberfläche; $r=0$ entspricht der Freistrahllängsachse⁴⁵⁹

Im Diagramm der Abb. 7-22 sind der maximale Einflussradius eines jeden Freistrahls und die relative noch wirksame kinetische Energie für jedes radiale Fluidvolumen. Diese liegt bei 68 % der Ausgangsfluidenergie nach der Umlenkung. Dies entspricht der in Tab. 7-19 angegebenen Energie.

Tab. 7-19: Kinetische Energie der Spritzstrahlen

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Kinetische Energie des Fluids beim Düsenausgang	E_{FD}	2,67	[J]	54 Düsen mit v_F ⁴⁶⁰
Kinetische Energie des Fluids auf Bauteil	E_{FB}	1,81	[J]	$r=l_d/2$
Kinetische Energie des Fluids für den Reinigungsprozess	E_{FD}	1,76	($\cdot 10^3$) [J]	Dauer Spritzreinigen $t=658$ s (s. Tab. 7-3)
Kinetische Energie des Fluids auf Bauteil	E_{FB}	1,19	($\cdot 10^3$) [J]	$r=l_d/2$; Dauer Spritzreinigen $t=658$ s (s. Tab. 7-3)

Wird analog zu Tab. 5-8 die erforderliche kinetische Energie berechnet, die zum Lösen der vorhandenen Verunreinigung benötigt wird, ergibt sich der in Tab. 7-20 angegebene Wert.

Tab. 7-20: Erforderliche kinetische Energie zum Lösen der Verunreinigung, s. Tab. 5-7

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Kinetische Energie des Fluids	E_{tP}	0,28	[J]	180 Bauteile

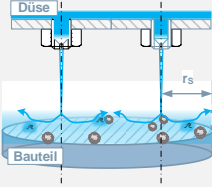
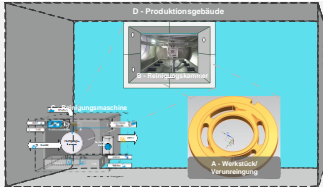
⁴⁵⁹ Eigene Darstellung.

⁴⁶⁰ Rechnung bezieht sich auf die kinetische Energie, die jede Sekunde aus den Düsenöffnungen tritt.

7.4.2 Energieeffizienz der Technologie Spritzreinigung - EEV_R

Wie in Abschnitt 3.3.2 definiert, kann aus dem Vergleich des technologischen Minimums und des gemessenen Energiebedarfs die physikalische Energieeffizienz der Reinigung berechnet werden. Das Ergebnis ist in Tab. 7-21 zusammengefasst.

Tab. 7-21: Berechnung der technologischen Energieeffizienz

Energetische Minima	Wert	Einheit	Energieeffizienz
ETM 	1,76	($\cdot 10^3$) [J]	$EEV_P = 1,77 \cdot 10^{-4}$
EBM 	9,9	($\cdot 10^6$) [J]	

Der hier berechnete Wert berücksichtigt zunächst nur den Anteil für die kinetische Energie. Der EEV_R liegt bei unter 0,2 % des gemessenen Energiebedarfs der Gesamtmaschine.

7.5 Berechnung des energetisch-physikalischen Minimums als Nutzen der Reinigung

7.5.1 Bindungsenergien der Partikel und filmischen Verunreinigung

Zur Berechnung der Bindungsenergien wird die in Kapitel 4 hergeleitete Methode verwendet. Dazu sind extrahierte Partikel von der Bauteiloberfläche in ihrer Grobstruktur und Form sowie der Feinstruktur und Oberflächenbeschaffenheit analysiert worden. Die Messdaten sind aller Partikel sind in Anhang D.5 zusammengefasst.

Zusätzlich zur Gestaltanalyse sind die in Tab. 7-22 aufgeführten Materialparameter benutzt worden, um die Bindungskräfte nach Gleichung (4-12) zu berechnen.

Tab. 7-22: Materialparameter

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Freier Oberflächenenergie	$\Delta\gamma$	0,092	[J/m ²]	Messung
Hamaker-Konstante	A_H	2,88	($\cdot 10^{-19}$) [J]	461

Die Ergebnisse der Bindungskräfte jedes analysierten Partikels sind im Diagramm in Abb. 7-23 dargestellt.

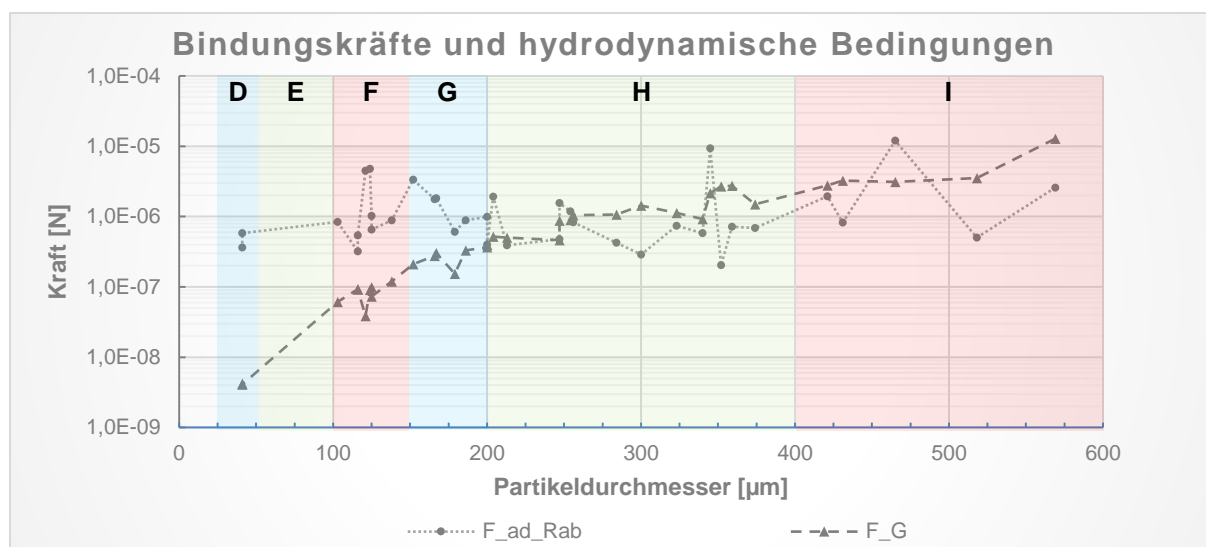


Abb. 7-23: Bindungskräfte und Gewichtskräfte der Partikelanalyse; in Großbuchstaben gekennzeichnet sind die Partikelgrößenklassen nach Tab. 4-1⁴⁶²

Im Diagramm sind alle untersuchten Partikel und deren berechneten adhäsiven Kräfte sowie Gewichtskräfte deren Partikeldurchmesser zugeordnet. Farblich abgegrenzt, sind die Partikelgrößenklassen und Bezeichnungen dargestellt. Bis einschließlich der Partikelgrößenklasse G überwiegen die adhäsiven Kräfte die Gewichtskräfte deutlich. Zu erkennen ist ebenfalls, dass die Bindungskräfte nur leicht mit steigendem Partikeldurchmesser ansteigen. Dies liegt an dem starken Einfluss der Oberflächenstruktur der Partikel.

Die Bindungen der filmischen Verunreinigungen wurden durch Extraktion und Analyse der chemischen Rückstandsmasse von bearbeitenden Referenzbauteilen. Das Protokoll und die ausgewertete Analyse ist in Anhang Abb. 8-9 erläutert. Das Ergebnis der Analyse und weiterer verwendeter Parameter der filmischen Verunreinigung ist in Tab. 7-23 zusammengefasst.

Tab. 7-23: Gemessene Parameter der filmischen Verunreinigungen

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Restschmutzmenge	m_L	14,07	($\cdot 10^{-6}$) [kg]	Pro Bauteil
Oberfläche Bauteil	A_P	2,57	($\cdot 10^{-2}$) [m ²]	Aus technischer Zeichnung
Dichte Mineralöl	ρ_L	0,8	($\cdot 10^3$) [kg/m ³]	Aus Datenblatt
Höhe der Filmschicht	h_L	68,4	($\cdot 10^{-6}$) [m]	Annahme der gleichmäßigen Verteilung auf Oberfläche
Oberflächenspannung	γ_L	44	($\cdot 10^{-3}$) [N/m]	Messung; dynamisch
Kontaktwinkel	θ_L	29,7	[°]	⁴⁶³

Mittels dieser Messdaten lassen sich die Kapillarkräfte berechnen und die benötigte hydrodynamische Gesamtkraft zum Lösen der Partikel, s. (5-8) Gleichung. Die Kräfte und abgeleiteten Fluidgeschwindigkeiten sind zusammen im Diagramm in dargestellt.

⁴⁶² Eigene Darstellung. Die Gewichtskraft wurde durch die Sphärizität abgewertet.

⁴⁶³ S. Schuler 2014, S. 83

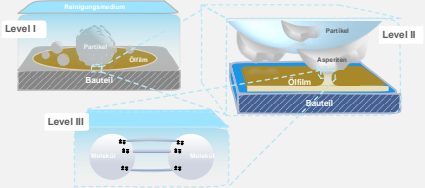
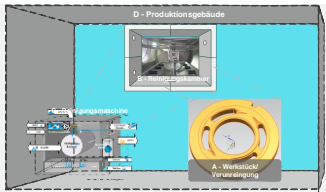
Tab. 7-24: EPM der Reinigung einer Steuerscheibe

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Energie zur Überwindung der $F_{ad ges}$	E_{MP}	0,00108	($\cdot 10^{-3}$) [J]	Bezogen auf 180 Bauteile; Weglänge zum Überwinden der Bindungskräfte $h_L=68,4 \mu m$
Bindungsenergie	E_{ML}	380,3	($\cdot 10^{-3}$) [J]	Bezogen auf 180 Bauteile
Gesamtbindungsenergie \Rightarrow Energetisch-Physikalisches Minimum	EPM	380,3	($\cdot 10^{-3}$) [J]	Bezogen auf 180 Bauteile

7.5.2 Physikalische Energieeffizienz der Technologie Spritzreinigung - EEV_P

Wie in Abschnitt 3.3.1 definiert, kann aus dem Vergleich des physikalischen Minimums und des gemessenen Energiebedarf die physikalische Energieeffizienz der Reinigung berechnet werden. Das Ergebnis ist in Tab. 7-25 zusammen gefasst.

Tab. 7-25: Berechnung der physikalischen Energieeffizienz

Energetische Minima	Wert	Einheit	Energieeffizienz
 <p>EPM</p>	380,3	($\cdot 10^{-3}$) [J]	
$EEV_P = 3,84 \cdot 10^{-8}$			
 <p>EBM</p>	9,9	($\cdot 10^6$) [J]	

Die Energieeffizienz bezüglich der realen Bindungsenergie in Relation zum Energiebedarf der Reinigungsmaschine in der Produktion ist sehr gering. Es wird nur jeder hundertmillionste Teil der Energie benötigt, um die tatsächlichen Bindungsenergien von der Verunreinigungen auf dem Bauteil zu lösen.

7.6 Bewertung der ermittelten Energieeffizienzen

Eine interessante Auswertung stellt der Vergleich der berechneten Energieeffizienzwerte zum gemessenen Energiebedarf der Maschine in der Produktion dar. Die Werte sind in Abb. 7-25 zusammengefasst.

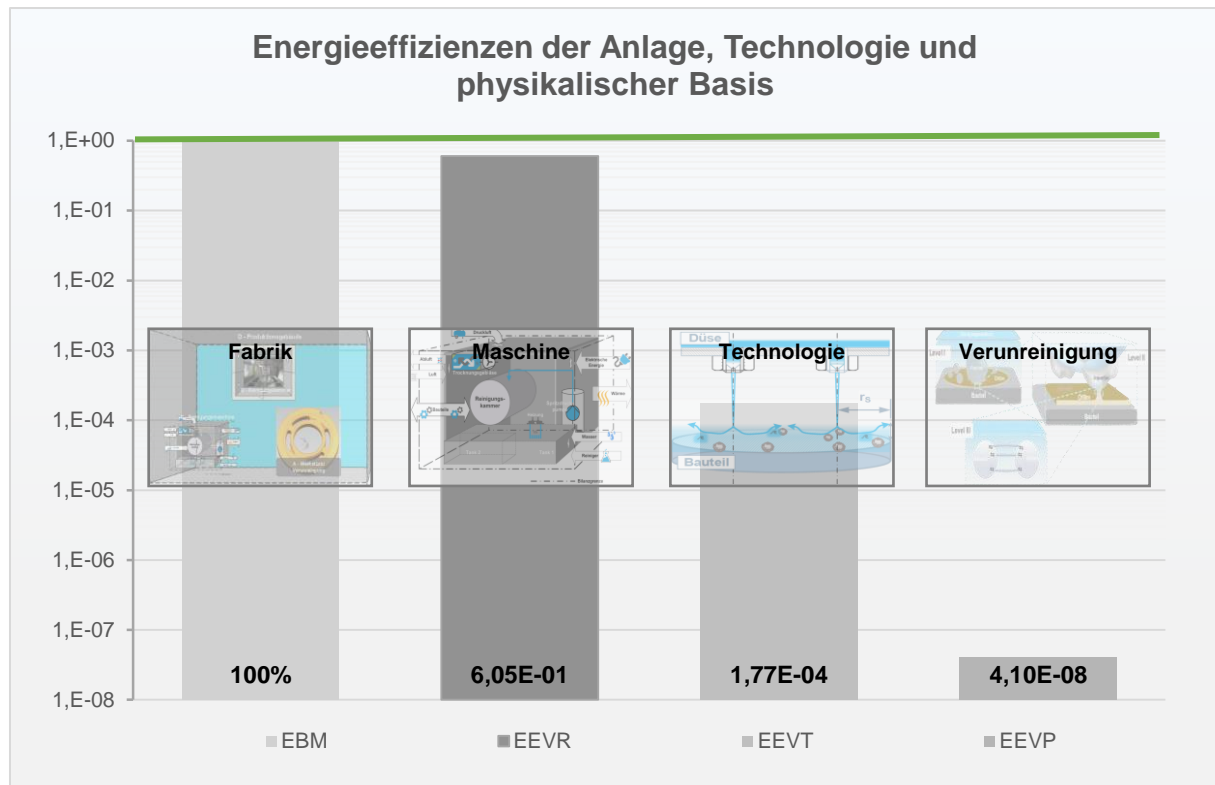


Abb. 7-25: Vergleich der Energieeffizienzen der Maschine (EEV_R), der Technologie (EEV_T) und der physikalischen Basis (EEV_P); die Achse der Energieeffizienzen hat eine logarithmische Skalierung⁴⁶⁵

Ausgehend von dem Energiebedarf der Maschine für den Produktionsbetrieb werden etwa 60 % der Energie auch in die Reinigungskammer geleitet. Die erforderliche kinetische Energie zum Lösen der Partikel und die Aufrechterhaltung des Fluidstroms zum Lösen der filmischen Verunreinigung betragen hingegen gerade 0,02 % des Gesamtenergiebedarfs. Vergleicht man den gemessenen Energiebedarf mit der tatsächlichen Bindungsenergie der Verunreinigung auf dem Bauteil, so entspricht dies einem Anteil von unter 0,000004 %.

7.6.1 Weitere Kennzahlen der Energieeffizienz

Wichtige Erkenntnisse können auch aus Vergleichen der Energieeffizienzwerte untereinander gezogen werden. Übersichtlich sind die Ergebnisse dieser Vergleiche in Tab. 7-26 zusammengefasst.

Tab. 7-26: Relationen der EEV zueinander

Energieminima	EEV	EEV _{T-R}	EEV _{P-T}
EBM	1		
ERM	0,605		
ETM	0,000177	0,00029	
EPM	3,84E-08		0,00022

⁴⁶⁵ Eigene Darstellung.

Die Relationen der verschiedenen Energieeffizienzwerte untereinander zeigen bereits, dass ein Großteil der jeweils bereitgestellten Energien in der jeweiligen MVC-Schale ungenutzt als Verluste dissipieren.

7.6.2 Parameteranalyse der Energieeffizienz

Es stellt sich die Frage, in welchen Bereichen die einzelnen Energieeffizienzwerte variieren und wovon sind die Energieeffizienzen im Wesentlichen abhängig. Zur Beantwortung dieser Fragestellung eignet sich eine Parameterstudie.

Das berechnete energetisch-physikalische Minimum hängt im Wesentlichen von der Flächengröße ab, auf der sich die Bindungen zwischen Verunreinigung und Bauteil befinden.⁴⁶⁶ Wie sich bei der Berechnung des EPM ebenfalls gezeigt hat, überwiegen die Bindungsenergien der filmischen Verunreinigungen, die der partikulären Bindungsenergien, um Größenordnungen, s. Tab. 7-24.

Werden, ausgehend von den berechneten Energieminima und EEV's, Benchmark-Werte ermittelt, so können aus diesen Benchmarks Optimierungsstrategien abgeleitet werden. Die Berechnungen hierzu fasst Tab. 7-27 zusammen.

Tab. 7-27: Verschiedene Energie-Benchmarks für die Versuchsanlage

	EPM [J]	EEV _{P-T}	ETM [J]	EEV _{T-R}	ERM [MJ]	EEV _R	EBM [MJ]	Bemerkung
Ausgang	0,38	0,00022	1.756,63	0,00029	6,02	0,605	9,97	
① ETM min	0,38	0,0468	256,29	0,000058	4,42	0,738	5,99	Angepasste Reinigungsdauer
② ETM (min) \wedge EEV_{P-T} (max)	0,38	0,0468	8,13					Minimal benötigte Geschwindigkeit
③ EEV_{T-R} (max)			1.756,63	0,00369	0,475			nur die kinetische Energie der Pumpe, ohne Trocknung und andere Komponenten; ohne Erwärmung der Bauteile (1378800 J)
④ ETM (max) \wedge EEV_{P-T} (max)	35,02	0,0199	1.756,63					Berechnung des maximalen Lösungsvermögens der Bindungen bei

Das minimale ETM in Zeile zwei der Tabelle ergibt sich aus der Reduzierung der Reinigungsdauer, auf gerade die notwendige Zeit, die zum Lösen der filmischen Verunreinigungen erforderlich ist. Dies verringert sowohl das ERM als auch das EBM. Darüber hinaus steigt die EEV_R, da anteilig vom Gesamtenergiebedarf mehr kinetische Energie die Reinigungskammer durchläuft.

Nimmt man den berechneten EEV_{P-T} als Ausgangswert, kann hiervon das geringstmögliche ETM berechnet werden, um die vorhandenen Verunreinigungen zu lösen.

Ein weiterer Benchmark kann bestimmt werden, in dem, ausgehend vom ERM, nur die Anteile zur Berechnung des EEV_{T-R} herangezogen werden, die tatsächlich an der Reinigung

⁴⁶⁶ Gültig unter der Annahme eines konstanten Verschmutzungsgrads der Bauteile.

beteiligt sind. Es wird somit nur die Pumpenenergie zur Bereitstellung der kinetischen Fluidenergie in die Reinigungskammer berechnet. Aus dem Vergleich zur Ausgangsbilanz lassen sich die Anteile der Reinigungsmaschine für die Peripherievorgänge und -aggregate ermitteln.

Trägt man die Energieeffizienzwerte über die jeweiligen Energieminima zusammen in ein Diagramm auf, ergibt sich das in Abb. 7-26 gezeigte Bild.

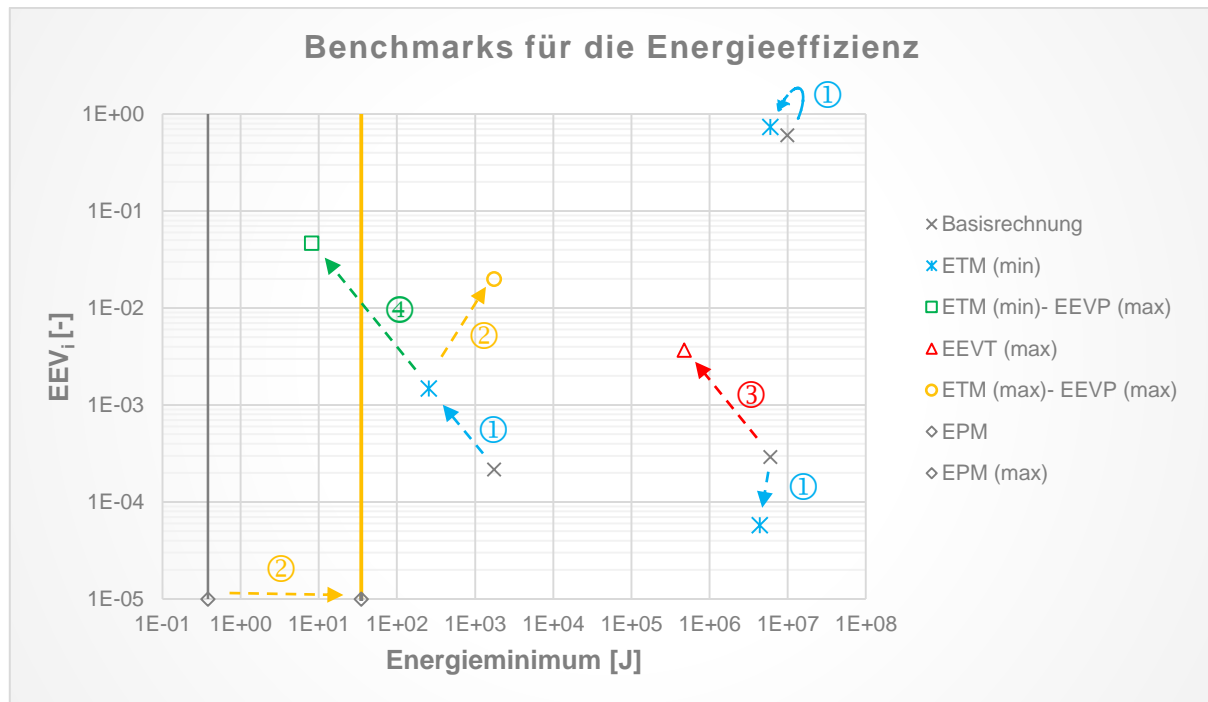


Abb. 7-26: Energieeffizienzwerte und zugeordnete Energieminima; Strichlinien zeigen die Benchmark-Werte für die Reinigungsmaschine und das Reinigungsverfahren – die Nummerierung entspricht der in Tab. 7-27⁴⁶⁷

Im Diagramm sind beide Achse in logarithmischer Skalierung geteilt. Die gestrichelt markierten Pfeile zeigen die Veränderungsrichtungen im Diagramm für jede Benchmark-Rechnung. Die Volllinien in grau (Basis) und gelb (Maximum des EPM) zeigen die Bindungsenergien der Verunreinigungen. Das Maximum gibt dabei an, welche Bindungsenergie mittels der bereitgestellten Energie des Ausgangsfalls maximal gelöst werden könnte.

Sollen Optimierungen an der Maschine durchgeführt werden, können die Lageänderungen im Diagramm die Art der Performance anzeigen. Eine Verschiebung nach oben links zeigt eine Effizienzsteigerung bei gleichzeitiger Energiebedarfsreduzierung. In Richtung oben rechts, wird die Effizienzsteigerung durch höhere Energiebedarfe erkauft. In Opposition dazu nach unten links bedeutet eine Reduzierung des Energiebedarfs bei gleichzeitigem Effizienzverlust. In Richtung unten rechts reduziert sich die Effizienz bei gleichzeitigem wachsendem Energiebedarf.

7.6.3 Energieeffizienz für Anwender von Reinigungsanlagen

Als Anwender stellt sich die Frage, ob ein bestehendes System effizienter bzw. optimierter gestalten lässt. Dazu muss der Ist-Stand analysiert, vermessen und dokumentiert werden. Als

⁴⁶⁷ Eigene Darstellung.

Ergebnis sollte nach der Effizienzbewertungsmethode die Empfehlung für Maßnahmen der Steigerung der Energieeffizienz stehen.

Hierbei sind die verschiedenen Anwendungen, wie sie in Unterkapitel 3.4 erläutert wurden, zu unterscheiden. Werden grundsätzlich Untersuchungen zur Wahl eines Reinigungsverfahrens durchgeführt, so sollten anhand von Restschmutzanalysen vor allem das EPM und ETM berechnet werden. Die daraus zu berechnende Energieeffizienz EEV_{P-T} gilt es, zu maximieren. Dies kann durch folgende grundlegende Anpassungen erfolgen:

1. Die Energieeffizienz von Spritzreinigungsverfahren wird maximiert, wenn die Partikelverschmutzung der Bauteile groß ist.

Die Energiedissipation erfolgt nicht durch das Lösen der Verunreinigungen, sondern durch die Spritzstrahlumlenkungen auf dem Bauteil und der radialen Ausbreitung. Um die größtmögliche Wirkung der kinetischen Energie der Spritzreinigung zu nutzen, ist der Wirkradius über eine hohe Anzahl an Düsen klein zu wählen.

2. Zum Lösen der filmischen Verunreinigungen sind die Massen- und Stofftransporte durch chemische Potenziale im Reinigungsmedium ursächlich. Zusätzliche kinetische Energie ist auf die Reaktionskinetik der beteiligten Substanzen abzustimmen und zu minimieren.

Durch die wesentlichen größeren Flächen, die durch filmische Verunreinigungen kontaminiert sind, hängt das EPM auch in großem Maße nur von dieser Variable ab. Steht die technische Sauberkeit im Fokus von Ölen und Fetten, sind kleine Aggregate für die mechanische Energie zur Unterstützung der konstanten kritischen Überkonzentration ausreichend.

7.6.4 Energieeffizienz für Hersteller von Reinigungsanlagen

Für den Hersteller besteht bezüglich einer aussagekräftigen Einschätzung zur Energieeffizienz seiner Anlagen die Schwierigkeit, dass keine Kenntnisse über die Nutzungsweise vorliegen. Das bedeutet, dass die Energieeffizienzwerte EEV_P und EEV_T nicht ermittelt, bzw. nur geschätzt, werden können. Aus diesem Grund ist es zielführend, die anlagenseitigen Konfigurationen durch Berechnung und Bewertung der Energieeffizienz EEV_R zu optimieren.

Um eine Einschätzung über die Energieeffizienz seiner Reinigungsanlagen, sollte der Hersteller vor allem zwei Kennzahlen optimieren und dem Kunden vermitteln:

3. Der Hersteller sollte für einzelne Partikelgrößenklassen ermittelte Werte der EEV_{T-R} als Energieeffizienzkriterium angeben.

Das Verhältnis aus energetisch-technologischem und energetisch-realen Minimum sollte ohne Peripherieaggregate, wie Trocknung, Badpflege u.a. angegeben werden. Dadurch kann eine optimale Auslegung auf eine wirksame Impulsübertragung des Fluids auf die Partikel

erfolgen. Es ist energetisch sinnvoll, die sowohl Bauteile als auch Medienzuführung in verschiedenen Relativpositionen zu bringen.⁴⁶⁸ Dadurch wird die erforderliche Wirkfläche jedes Spritzstrahls in die Reinigungskammer deutlich reduziert.

4. Der Hersteller sollte in einem Referenzszenario unter Angabe der Medien- und Umgebungstemperatur den EEV_R maximieren. Hierdurch wird der Anteil der Energie angegeben, der die Reinigungskammer nicht erreicht. Dies dient einer Evaluation der Wärmetransportvorgänge.

⁴⁶⁸ In vielen Anlagen finden sich hierfür Antriebe zur Rotation der Bauteile und der Düsenträger.

8 Schlussbetrachtung und Ausblick

Die industrielle Bauteilreinigung rückt bei der Planung und Optimierung in der metallverarbeitenden Industrie zunehmend in den Fokus der Unternehmen und des verantwortlichen Managements. Insbesondere erhält das Thema Energiemanagement durch sich ändernde politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen für eine immer größere Aufmerksamkeit. Die Bauteilreinigung mit ihren inhärenten großen Energieumsätzen muss dabei besonders berücksichtigt werden.

In dieser Dissertation wurden die am häufigsten eingesetzten wässrigen Reinigungsverfahren und mit ihr die genutzten Anlagen erstmals in jeglicher Dimension hinsichtlich ihrer Energieeffizienz untersucht. Mit der inhaltlichen Auseinandersetzung der zur Verfügung stehenden Instrumente und Methode zur Bewertung des Energieeinsatzes für Produktionsanlagen wurde aufgezeigt, dass eine Vielzahl an Bewertungsmethoden entwickelt wurden. Durch die verschiedenen Randbedingungen und Zielsetzungen dieser Methoden wurde eine Bewertungssystematik für wässrige Bauteilreinigungsanlagen entwickelt. Dadurch ist dem Anwender der Energieeffizienzbewertung möglich, systematisch

- den **Untersuchungsgegenstand**, als Modell für den energetischen Nutzen,
- die **Aussageart**, als Zielgrößendefinition und
- den **Bewertungsraum**, als Modell für den energetischen Aufwand

zu analysieren und auszuwerten.

Innerhalb dieser grundlegenden Systematik wurde die MVC-Methode für die wässrige Bauteilreinigung entwickelt. Die energetische Analyse wird durch Berechnung von **Energieminima** geführt.

Das **energetisch-physikalische** Energieminimum berechnet dabei die direkten Bindungsenergien, die sich zwischen den Verunreinigungen und der Bauteiloberfläche einstellen. Diese Bindungskräfte müssen über Lösungsmechanismen überwunden werden, damit diese unerwünschten Stoffe entfernt werden können. Die Analyse und Berechnungen unterschieden partikuläre und filmische Verunreinigungen.

Die **Partikel** sind durch normierte Extraktionsverfahren von den Bauteilen gewonnen und mit einem Elektronenmikroskop auf zwei verschiedenen Längenskalen vermessen worden. Auf einer großen Längenskala $\mathcal{O}(10^{-4}m)$ werden die geometrischen Abmessungen und Formgestalt bestimmt. Zum einen werden diese Daten zur Klassifizierung des Schädigungspotenzials genutzt und zum anderen können damit die strömungstechnischen Widerstände der Partikel berechnet werden. Die Verwendung eines Elektronenmikroskops ermöglicht die Auflösung der Oberflächenfeinstruktur der Partikel $\mathcal{O}(10^{-8}m)$, mit der sich die direkten Kontaktflächen berechnen lassen, über die die adhäsiven Bindungskräfte wirken.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die adhäsiven Kräfte für Partikel bis zur Größenklasse F ($< 150 \mu m$) die Gewichtskräfte überwiegen. Treten durch Kombinationen von Verunreinigungen zusätzlich auch Kapillarkräfte auf, so können diese die Gesamtbindungskräfte

um mehr als 50 % erhöhen. Die Bindungskräfte, die bei der Verbindung von filmischen Verunreinigungen bilden, übersteigen die partikuläre bei weitem. Dies wird durch die deutlich größeren Kontaminationsflächen erklärt.

Die wässrige Bauteilreinigung beruht auf dem Lösungsmechanismus durch Impulsübertragung des bewegten Reinigungsfluids. Die erzeugte kinetische Energie durch einen umgelenkten Freistrahler ergibt das **energetisch-technische** Minimum. Es wurde gezeigt, dass die wirksame kinetische Energie zum Lösen der Bindungskräfte vom radialen Abstand von der Strahlachse abhängig ist. Dieser Abstand stellt auch die Begrenzung der ablösbaren Partikelgrößenklasse dar. Je geringer die erforderliche Partikelgrößenklasse desto größer ist die minimale Fluidgeschwindigkeit, die an den entsprechenden Partikeln wirkt. Für die chemischen Lösungsvorgänge ist für eine effektive Wirkung der Reinigungshilfsstoffe die Erzeugung der Krafft-Temperatur essenziell. Die Beschreibung der Stoff- und Massentransporte durch Diffusionsprozesse in Mizellen beschreiben auch für die benötigten Prozessdauern. Triebkraft des Massentransports ist die Stoffkonzentration.

Das **energetisch-reale** Minimum fasst die Energiebeträge zusammen, die für Prozesse eines realen Fertigungsverfahrens benötigt werden. Hierzu zählen bei der wässrigen Bauteilreinigung vor allem Trocknungs- und Spülvorgänge. Diese peripheren Prozesse sind notwendig, um Korrosion zu verhindern und die weitere Bauteilbearbeitung zu ermöglichen.

Als Produktionsanlage wechselwirkt die Reinigungsmaschine als thermodynamisches System mit der Fabrikumgebung. Diese Wechselwirkung lässt sich über eine Energiebilanz nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik beschreiben und berechnen. Diese Analysen können die Differenz zwischen dem realen Minimum und dem **gemessenen Energiebedarf** auflösen.

Der Vergleich zwischen den Minima beschreiben die Energieeffizienzwerte, die als Basis für die Bewertung von Reinigungsanlagen und –verfahren und dessen energetischen Verhaltens dienen. Alle Untersuchungen wurden in einer realen Produktionsumgebung zur Herstellung eines Drehbauteils durchgeführt und validiert.

Die Berechnung der Energieeffizienz zeigt, dass die tatsächlichen Bindungsenergien der Verunreinigungen nur einem sehr kleinen Teil vom dem entsprechen, der für den Betrieb einer Reinigungsmaschine in der Produktion entspricht. Die Werte liegen in der Größenordnung von $\mathcal{O}(10^{-8})$. Die Parametrierung der Energieeffizienzwerte zeigt, dass sich bei der wässrigen Spritzreinigung hohe Effizienzen durch große Verunreinigungen ergeben. Somit sollte die Anlagenkonfiguration vor allem auf die Art der Bauteile ausgelegt werden. Die thermodynamische Bilanzierung konnte beweisen, dass bei kompakten Einkammeranlagen bereits ein Großteil des gemessenen Gesamtenergiebedarfs auch in die Behandlungskammer fließt. Die Bewertung der Energieeffizienz durch die aufeinander aufbauenden energetischen Schalensystemen ermöglicht eine transparente Kommunikation innerhalb verschiedener Interessengruppen. Verfahrensplaner können durch die eine deskriptive Evaluation der physikalisch-technologischen Energieeffizienz Verfahrensalternativen und –abläufe energetisch bilanzieren und optimieren. Der Vertrieb und Einkauf von Hersteller und Nutzer der Anlagen können durch die Nutzung der realen Energieeffizienz als energiebezogene Kennzahl über notwendige Energiekostenanteile für die Bauteilreinigung wissenschaftlich basierte Entscheidungen treffen.

Die Anwendung der Bewertungssystematik ist jedoch auch mit gewissen Einschränkungen verbunden. Die Einteilung der Schalen der MVC-Methode ist abhängig vom jeweiligen Verfahren. So können die Prozessspezifikationen der sowohl bei den technologischen als auch realen Energieminima einbezogen werden. Hier ist die Erfahrung des Planers für eine sinnvolle Einteilung unerlässlich. Auch ist der Aufwand zur Ermittlung und Messung aller benötigten Parameter und Daten nicht zu unterschätzen. Als Empfehlung kann aus den Erfahrungen dieser Arbeit gegeben werden, dass sich möglichst auf einzelne Schalen und Berechnungen einzelnen Energieeffizienzwerte fokussiert werden sollte.

Neben den genannten Punkten und gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich folgende weitere Forschungsfragestellungen:

- Die Entwicklung einer einfachen Auswertungsmethodik zur Ermittlung von geometrischen *Grob- und Feinstrukturen* von Partikeln. Die Bestimmung der Feinstruktur erfordert bisher eine zeit- und kostenintensive Messanalytik. Im Rahmen dieser Arbeit konnten interessante Ansätze unter Nutzung von *machine learning* Algorithmen gefunden werden, deren Fortsetzung aber nicht mehr im Fokus dieser Ergebnisdarstellung lagen.
- Die thermodynamische Bilanzierung der *Enthalpie- und Wärmeströme* stellt eine große Herausforderung an die Messtechnik und Analysten dar. Wie bereits andere Veröffentlichungen zeigten, ist eine analytische Lösung und automatisierte Auswertung der thermodynamischen Vorgänge bisher nicht verfügbar.
- Die Bewertung der Energieeffizienz der *physikochemischen Vorgänge* ist systematisch für verschiedene Anwendungen nur in Teilen möglich. Die Abhängigkeit von den beteiligten Stoffsystemen aus Verunreinigung und grenzflächenaktiven Substanzen ist sehr groß. Die Auflösung von energetischem Nutzen zu energetischem Aufwand sowohl auf molekularer Ebene als auch auf Gesamtstoffmengen bezogen, stellt eine große Herausforderung dar.

Grundsätzlich sollte die erarbeitete Methode auch auf andere Reinigungsverfahren erweitert werden. Dadurch können vor allem die energetisch-technologischen Energieeffizienzen als Auslegungs- und Optimierungskennzahl verwendet werden. Die Nutzung und Weiterentwicklung der Bewertungssystematik von Energieeffizienz in Wissenschaft und Praxis ist wünschenswert.

A Literaturverzeichnis

ABB STOTZ-KONTAKT GmbH (Hg.) (2011): Raumklimaregelung mit ABB i-bus KNX. Heizen/Kühlen - Lüftung/Klima (2CDC 500 070 M0101).

Abele, E.; Altintas, Y.; Brecher, C. (2010): Machine tool spindle units. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2), S. 781–802. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.002.

Abele, E.; Schrems, S.; Schraml, P. (2012): Energieeffizienz in der Fertigungsplanung. Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung. In: *Werkstattstechnik online* 102 (1), S. 38–42.

Abele, Eberhard; Schneider, Jens; Beck, Martin; Andreas, Maier (Hg.) (2018): ETA – die Modell-Fabrik. Energieeffizienz weiter gedacht. TU Darmstadt. Darmstadt.

Alexandridis, Paschalis; Holzwarth, Josef F.; Hatton, T. Alan (1994): Micellization of Poly(ethylene oxide)-Poly(propylene oxide)-Poly(ethylene oxide) Triblock Copolymers in Aqueous Solutions: Thermodynamics of Copolymer Association. In: *Macromolecules* 27 (9), S. 2414–2425. DOI: 10.1021/ma00087a009.

Atkins, Peter W.; Paula, Julio de; Bär, Michael (2013): Physikalische Chemie. 5. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH Verl. (Wiley VCH Lehrbuchkollektion 1). Online verfügbar unter <http://textbooks.wiley-vch.de/book/atkins2472/>.

AZUMA, Tsuneo; HOSHINO, Tatsuroh (1984): The Radial Flow of a Thin Liquid Film : 3rd Report, Velocity Profile. In: *Bulletin of JSME* 27 (234), S. 2755–2762. DOI: 10.1299/jsme1958.27.2755.

Bhunia, Sourav K.; Lienhard, John H. (1994): Splattering During Turbulent Liquid Jet Impingement on Solid Targets. In: *J. Fluids Eng.* 116 (2), S. 338. DOI: 10.1115/1.2910277.

Bilz, Martin; Mankiewicz, J.; Motschmann, S. (2013): Markt- und Trendanalyse in der Industriellen Teilereinigung 2012. Berlin: Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik.

Blasius, H. (1908): Grenzschichten in Flüssigkeiten mit Kleiner Reibung. In: *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 56 (1), S. 1–37.

Blau, Peter; Hermann, Ihlenfeldt, Steffen; Christoph; Thiede, Sebastian; Zein, André (2009): Energy Efficiency of Machine Tools: Extending the Perspective. In: Proceedings of the 42nd CIRP Interantional Conference on Manufacturing Systems. CIRP Interantional Conference on Manufacturing Systems. Grenoble, France, 3-5 Juni 2009.

Blesl, Markus; Kessler, Alois (2017): Energieeffizienz in der Industrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Blum, F. D.; Pickup, S.; Ninham, B.; Chen, S. J.; Evans, D. F. (1985): Structure and dynamics in three-component microemulsions. In: *J. Phys. Chem.* 89 (4), S. 711–713. DOI: 10.1021/j100250a030.

Blum, T.; Chaban, M.; Braun, R.; Huchel, Uwe; Klümper-Westkamp, Heinrich (2015): FA 3 Nitrieren und Nitrocarburieren: Vermeidung von Sperrschichten auf nitrierten Bauteilen – Eine Anleitung zum Handeln. In: *HTM* 70 (5), S. 248–257. DOI: 10.3139/105.015057.

Böckh, Peter; Wetzel, Thomas (2017): Wärmeübertragung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Böckh, Peter von; Stripf, Matthias (2015): Technische Thermodynamik. Ein beispielorientiertes Einführungsbuch. 2., neu bearb. u. erw. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (SpringerLink : Bücher).

Branham, Matthew; Gutowski, Timothy G.; Jones, Alissa; Sekulic, Dusan P. (2008): A thermodynamic framework for analyzing and improving manufacturing processes. In: 2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (ISEE). San Francisco, CA, USA, S. 1–6.

BUCKINGHAM, E. (1915): The Principle of Similitude. In: *Nature* 96 (2406), S. 396–397. DOI: 10.1038/096396d0.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.) (2014): Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz. Mehr aus Energie machen. Öffentlichkeitsarbeit. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/nationaler-aktionsplan-energieeffizienz-nape.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 07.12.2018.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016): Zentrale Vorhaben Energiewende. Die "10-Punkte Agenda" der Energiewende. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/I/Infografiken/10-punkte-agenda.pdf?__blob=publicationFile&v=10, zuletzt geprüft am 18.12.2018.

Butt, Hans-Jürgen; Kappl, Michael (2018): Surface and Interfacial Forces. Second Edition. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5330836>.

Clausius, Rudolf (1864): Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie: F. Vieweg.

Cornell, Rochelle M.; Schwertmann, Udo (2003): The Iron Oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses. 2nd, Completely Revised and Extended ed. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://www.myilibrary.com/?id=56077>.

da Silva, Lucas F. M.; Öchsner, Andreas; Adams, Robert D. (2011): Handbook of Adhesion Technology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Dahmus, Jeffrey B.; Gutowski, Timothy G. (2004): An Environmental Analysis of Machining. In: Proceedings of IMECE 2004. ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Anaheim, California, USA, November 13 – 19, 2004. IEEE, S. 643–652.

Degner, Werner; Lutze, Hans; Smejkal, Erhard (2015): Spanende Formung. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Denkena, Berend; Tönshoff, Hans Kurt (2011): Spanen. Grundlagen. Wiesbaden: Springer Fachmedien (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=798908>.

Derjaguin, B.V.; Muller, V.M.; Toporov, Yu.P (1975): Effect of contact deformations on the adhesion of particles. In: *Journal of colloid and interface science* 53 (2), S. 314–326. DOI: 10.1016/0021-9797(75)90018-1.

Dietmair, Anton; Verl, Alexander (2008): Energy consumption modeling and optimization for production machines. In: 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). Singapore, Singapore, S. 574–579.

Donlan, Rodney M. (2002): Biofilms: microbial life on surfaces. In: *Emerging infectious diseases* 8 (9), S. 881–890. DOI: 10.3201/eid0809.020063.

Doppelbauer, Martin (Hg.) (2011): Drehende elektrische Maschinen. Erläuterungen zu DIN EN 60034 (VDE 0530). Deutsche Elektrotechnische Kommission. 8., vollst. überarb. Aufl. Berlin: VDE-Verl. (VDE-Schriftenreihe Normen verständlich, 10).

Dutschk, Victoria (2000): Oberflächenkräfte und ihr Beitrag zu Adhäsion und Haftung in glasfaserverstärkten Thermoplasten. Dissertation. Technische Universität, Dresden.

Eggers, Jens; Villiermaux, Emmanuel (2008): Physics of liquid jets. In: *Rep. Prog. Phys.* 71 (3), S. 36601–36680. DOI: 10.1088/0034-4885/71/3/036601.

Einstein, A. (1905): Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. In: *Ann. Phys.* 322 (8), S. 549–560. DOI: 10.1002/andp.19053220806.

Eisele, Christian (2014): Simulationsgestützte Optimierung des elektrischen Energiebedarfs spanender Werkzeugmaschinen. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des PTW).

Eisele, Christian; Abele, Eberhard (2013): Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktentwicklung : Forschungsbericht ; Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes: eSimPro ; ... im Rahmen-

konzept "Forschung für die Produktion von morgen". Unter Mitarbeit von TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover, Technische Informationsbibliothek (TIB) und Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen. Darmstadt.

VDI-Richtlinie 4661, August 2014: Energiekenngrößen - Grundlagen - Methodik.

ISO 50001, 08/2018: Energiemanagementsysteme.

DIN ISO 50006, 2017: Energiemanagementsysteme.

Epple, Bernd; Leithner, Reinhard; Linzer, Wladimir; Walter, Heimo (2012): Simulation von Kraftwerken und Feuerungen. Vienna: Springer Vienna.

Europäisches Parlament und Rat (18.12.2006): Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe. REACH.

Europäisches Parlament und Rat (04.07.2017): Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung und zur Aufhebung der Richtlinie 2010/30/EU, VERORDNUNG (EU) 2017/1369. In: Amtsblatt der Europäischen Union. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2017/1369/oj>, zuletzt geprüft am 04.10.2108.

DIN 8580, 2003-09-00: Fertigungsverfahren.

DIN 8592, September 2003: Fertigungsverfahren Reinigen.

Fong, S.-T.; Beddow, J. K.; Vetter, A. F. (1979): A refined method of particle shape representation. In: *Powder Technology* 22 (1), S. 17–21. DOI: 10.1016/0032-5910(79)85003-2.

Fowkes, Frederick M. (1963): ADDITIVITY OF INTERMOLECULAR FORCES AT INTERFACES. I. DETERMINATION OF THE CONTRIBUTION TO SURFACE AND INTERFACIAL TENSIONS OF DISPERSION FORCES IN VARIOUS LIQUIDS 1. In: *J. Phys. Chem.* 67 (12), S. 2538–2541. DOI: 10.1021/j100806a008.

Gerthsen, Tarsilla (2008): Chemie für den Maschinenbau. Karlsruhe: Univ.-Verl.

Girbig, Paul (2017): Energiemanagementsysteme. In: Frank J. Matzen und Ralf Tesch (Hg.): Industrielle Energiestrategie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 411–427.

Glazik, Günter; Kraatz, Willi; Kranawettreiser, Jörg; Martin, Helmut; Wagner, Harold (2015): Technische Hydromechanik. 2., vollständig überarbeitete Auflage. Hg. v. Detlef Aigner und Dirk Carstensen. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH (Wissen Bauwesen).

Gleich, Sven (2008): Simulation des thermischen Verhaltens spanender Werkzeugmaschinen in der Entwurfsphase. Dissertation. Technische Hochschule, Chemnitz.

Good, R. J.; Srivatsa, N. R.; Islam, M.; Huang, H.T.L.; van Oss, C. J. (1990): Theory of the acid-base hydrogen bonding interactions, contact angles, and the hysteresis of wetting: application to coal and graphite surfaces. In: *Journal of Adhesion Science and Technology* 4 (1), S. 1–617. DOI: 10.1163/156856190X00559.

Götze, U.; Koriath, H.-J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold, J.; Scheffler, C. (2010): Energetische Bilanzierung und Bewertung von Werkzeugmaschinen.

Gray, Christopher G.; Gubbins, Keith E.; Joslin, Christopher G. (2011): Theory of Molecular Fluids. Volume 2: Applications: Oxford University Press.

GROSSMANN, Andreas (2015): Reinigen in der Praxis. 6. Fachkongress Technische Sauberkeit in Montage- und Produktionsprozessen. SÜDDEUTSCHER VERLAG VERANSTALTUNGEN. Steyr, A, 19.05.2015.

Grün, Reiner (2016): Industrielle Teilereinigung: Eine Übersicht. In: *Galvanotechnik* 107 (10), 875-888/1162-1175.

Guha, Anirban; Barron, Ronald M.; Balachandar, Ram (2011): An experimental and numerical study of water jet cleaning process. In: *Journal of Materials Processing Technology* 211 (4), S. 610–618. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.11.017.

Gülich, Johann Friedrich (2010): Kreiselumpen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Gutowski, Timothy; Dahmus, Jeffrey; Thiriez, Alexandre (2006): Electrical energy requirements for manufacturing processes. In: *Procedia CIRP; 13th CIRP international conference on life cycle engineering* 31, S. 623–638.
- Gutowski, Timothy; Dahmus, Jeffrey; Thiriez, Alexandre; Branham, Matthew; Jones, Alissa (2007): A Thermodynamic Characterization of Manufacturing Processes. In: 2007 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. Orlando, USA, S. 137–142.
- Gutowski, Timothy G.; Branham, Matthew S.; Dahmus, Jeffrey B.; Jones, Alissa J.; Thiriez, Alexandre; Sekulic, Dusan P. (2009): Thermodynamic Analysis of Resources Used in Manufacturing Processes. In: *Environ. Sci. Technol.* 43 (5), S. 1584–1590. DOI: 10.1021/es8016655.
- Haase, Brigitte; Brunn, Karl; Grün, Rainer; Hasler, Josef; Kunz, Ulrike; Stedry, Bernd (1996): Bauteilreinigung - Alternativen zum Einsatz von Halogenkohlenwasserstoffen. Reinigungsmittel, Reinigungsmechanismen und Reinigungsanlagen ; mit 20 Tabellen und 18 Literaturstellen. Renningen-Malmsheim: Expert-Verl.
- Habenicht, Gerd (2009): Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendungen. 6., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85266-7>.
- Hamaker, H. C. (1937): The London – van der Waals attraction between spherical particles. In: *Physica* 4 (10), S. 1058–1072. DOI: 10.1016/S0031-8914(37)80203-7.
- Hans Lingl Anlagenbau und Verfahrenstechnik GmbH & co. KG (2012): Ganzheitlicher Ansatz für Energiemanagement nach DIN EN16001 bzw. ISO 50001. Energie Monitoring System (EMS) von Lingl. In: *Zi Ziegelindustrie International* (10), S. 1–2.
- Heneka, Bernhard E. (2018): Restschmutz-Probleme lückenlos erfassen. In: *J Oberfl Techn* 58 (S5), S. 18–19. DOI: 10.1007/s35144-018-0370-9.
- Hering, Ekbert; Martin, Rolf; Stohrer, Martin (2012): Physik für Ingenieure. Mit 116 Tabellen und 2 Faltafeln. 11., bearb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Hering, Ekbert; Martin, Rolf; Stohrer, Martin (2016): Physik für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hertz, H. (1882): Ueber die Berührung fester elastischer Körper. In: *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik* 1882 (92), S. 156–171. DOI: 10.1515/crll.1882.92.156.
- Hesselbach, Jens (2012): Energie- und klimaefiziente Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Hölzer, Andreas (2007): Bestimmung des Widerstandes, Auftriebs und Drehmoments und Simulation der Bewegung nichtsphärischer Partikel in laminaren und turbulenten Strömungen mit dem Lattice-Boltzmann-Verfahren. Doctoral thesis. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- Hopf, Hendrik (2015): Methodik zur Fabrikssystemmodellierung im Kontext von Energie- und Ressourceneffizienz. Dissertation. Online verfügbar unter <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4090458>.
- Howell, John R. (2001): A CATALOG OF RADIATION HEAT TRANSFER CONFIGURATION FACTORS. University of Texas at Austin. Austin. Online verfügbar unter <http://www.thermalradiation.net/tablecon.html>, zuletzt geprüft am 14.11.2018.
- Howell, John R.; Mengüç, M. Pinar; Siegel, Robert (2016): Thermal radiation heat transfer. Sixth edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press.
- Hunt, Shelby D. (2005): For Truth and Realism in Management Research. In: *Journal of Management Inquiry* 14 (2), S. 127–138. DOI: 10.1177/1056492605275242.
- Idelčik, Isaak Evseevič; Ginevskii, Aron Semenovich (Hg.) (2007): Handbook of hydraulic resistance. 4., rev. and augmented ed. Redding, Conn.: Begell House.
- Inventec Performance Chemicals Deutschland (2012): Umweltschonend reinigen in fünf Schritten. In: *J Oberfl Techn* 52 (11), S. 40–41. DOI: 10.1365/s35144-012-0509-z.

- Ishikawa, Kaoru (1997): Introduction to quality control. 5. print. Tokyo: 3A Corporation.
- Israelachvili, Jacob N. (2011): Intermolecular and surface forces. 3. ed. Burlington, MA: Academic Press. Online verfügbar unter <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=630012>.
- Jaffe, Adam B.; Stavins, Robert N. (1994): The energy-efficiency gap What does it mean? In: *Energy Policy* 22 (10), S. 804–810. DOI: 10.1016/0301-4215(94)90138-4.
- Jędrzejewski, J.; Kowal, Z.; Kwaśny, W.; Modrzycki, W. (2005): High-speed precise machine tools spindle units improving. In: *Journal of Materials Processing Technology* 162-163, S. 615–621. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.149.
- Johnson, K. L.; Kendall, K.; Roberts, A. D. (1971): Surface Energy and the Contact of Elastic Solids. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 324 (1558), S. 301–313. DOI: 10.1098/rspa.1971.0141.
- Junge, Felix; Abele, Eberhard; Vogel, Florian (2017): Qualification of Aqueous Part Cleaning Machines for the Use of Waste Heat in Industrial Production Companies. In: *Procedia CIRP* 61, S. 570–575. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.201.
- Junge, Mark; Holzäpfel, Christoph (2011): Energieeffizienz bewerten. Monitoringsysteme müssen Daten automatisch auswerten und übersichtlich darstellen können. In: *Energy 2.0-Kompodium*, S. 94–97.
- Kabelac, Stephan; Vortmeyer, Dieter (2013): Sichtfaktoren. In: VDI e.V. (Hg.): VDI-Wärmeatlas. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg (VDI-Buch), S. 1097–1115.
- Kaelble, D. H. (1970): Dispersion-Polar Surface Tension Properties of Organic Solids. In: *The Journal of Adhesion* 2 (2), S. 66–81. DOI: 10.1080/0021846708544582.
- Kaye, B. H. (1978): Specification of the ruggedness and/or texture of a fine particle profile by its fractal dimension. In: *Powder Technology* 21 (1), S. 1–16. DOI: 10.1016/0032-5910(78)80103-X.
- Kimmel, Tobias; Lake, Markus K.; Vitta, Sandeep (2018): Oberflächenkontamination einfach analysiert. In: *J Oberfl Techn* 58 (S5), S. 48–53. DOI: 10.1007/s35144-018-0374-5.
- Kipp, Burghard (2008): Analytische Berechnung thermischer Vorgänge in permanentmagneterregten Synchronmaschinen. Dissertation. Helmut-Schmidt-Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg. Online verfügbar unter http://edoc.sub.uni-hamburg.de/hsu/volltexte/2008/1413/pdf/2008_Kipp.pdf, zuletzt geprüft am 31.12.2016.
- Klocke, Fritz (2018): Fertigungsverfahren 1. Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kloke, Udo (2003): Auslegung von Bauteilreinigungsanlagen mit Hilfe eines Fachinformationssystems. Dissertation. Technische Universität Dortmund, Dortmund. Online verfügbar unter <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/2820/1/Klokeunt.pdf>.
- Klümper-Westkamp, Heinrich; Zoch, H.-W.; Bauerdick, Christoph; Junge, Felix; Abele, Eberhard (2016): Energy and media efficient nitriding and nitrocarburising. In: *Proceedings of the 3th Mediterranean Conference on Heat Treatment and Surface Engineering*, S. 192–198.
- Kraume, Matthias (2012): Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kreitlein, S.; Spreng, S.; Franke, J. (2015): ElBenchmark – A Pioneering Method for Process Planning and Sustainable Manufacturing Strategies. In: *Procedia CIRP* 26, S. 150–155. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.070.
- Kuhrke, Benjamin (2011): Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2011. Berlin: epubli GmbH (Schriftenreihe des PTW).
- Kumar, Aditya; Staedler, Thorsten; Jiang, Xin (2013): Role of relative size of asperities and adhering particles on the adhesion force. In: *Journal of colloid and interface science* 409, S. 211–218. DOI: 10.1016/j.jcis.2013.07.039.
- Kuske, Philipp (2013): Methode zur Gestaltung einer Know-how-Schutzstrategie für den Maschinen- und Anlagenbau. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2013. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des PTW).

- LaMarche, Casey Q.; Leadley, Stuart; Liu, Peiyuan; Kellogg, Kevin M.; Hrenya, Christine M. (2017): Method of quantifying surface roughness for accurate adhesive force predictions. In: *Chemical Engineering Science* 158, S. 140–153. DOI: 10.1016/j.ces.2016.09.024.
- Latscha, Hans Peter; Kazmaier, Uli; Klein, Helmut (Hg.) (2016): *Organische Chemie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).
- Lauth, Günter Jakob; Kowalczyk, Jürgen (2016): *Einführung in die Physik und Chemie der Grenzflächen und Kolloide*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lehr, Ulrike; Walter, Helena; Lutz, Christian (2017): *Energiewirtschaftliche Gesamtrechnung. Methoden und exemplarische Berechnungen*. Hg. v. Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung (GWS) mbH. Osnabrück. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/energiewirtschaftliche-gesamtrechnung.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 07.12.2018.
- Leite, Fabio L.; Bueno, Carolina C.; Da Róz, Alessandra L.; Ziemath, Ervino C.; Oliveira, Osvaldo N. (2012): Theoretical models for surface forces and adhesion and their measurement using atomic force microscopy. In: *International journal of molecular sciences* 13 (10), S. 12773–12856. DOI: 10.3390/ijms131012773.
- Li, W.; Kara, S. (2011): An empirical model for predicting energy consumption of manufacturing processes. A case of turning process. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 225 (9), S. 1636–1646. DOI: 10.1177/2041297511398541.
- Lienhard, J. (2006): Heat Transfer by Impingement of Circular Free-Surface Liquid Jets. In: Subhash C. Mishra (Hg.): *Heat and mass transfer 2006*. Proceedings of the 18th National & 7th ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference, January 4 - 6, 2006, Indian Institute of Technology, Guwahati, India. New Delhi: Tata McGraw-Hill.
- Lienhard, John H. (1995): LIQUID JET IMPINGEMENT. In: *Annual Rev Heat Transfer* 6 (6), S. 199–270. DOI: 10.1615/AnnualRevHeatTransfer.v6.60.
- Liu, X.; Lienhard, J. H.; Lombara, J. S. (1991): Convective Heat Transfer by Impingement of Circular Liquid Jets. In: *J. Heat Transfer* 113 (3), S. 571. DOI: 10.1115/1.2910604.
- Mauermann, Marc (2012): *Methode zur Analyse von Reinigungsprozessen in nicht immmergierten Systemen der Lebensmittelindustrie*. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Online verfügbar unter [urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-90069](http://nbn:de:bsz:14-qucosa-90069).
- Maxwell, J. C. (1865): A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155 (0), S. 459–512. DOI: 10.1098/rstl.1865.0008.
- Mehta, S. K.; Bhawna; Kaur, Khushwinder; Bhasin, K. K. (2008): Micellization behavior of cationic surfactant dodecyldimethylethylammonium bromide (DDAB) in the presence of papain. In: *Colloids and Surfaces A: Physico-chemical and Engineering Aspects* 317 (1-3), S. 32–38. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2007.09.029.
- Merkus, Henk G. (2009): *Particle Size Measurements*. Dordrecht: Springer Netherlands (17).
- VDMA-Einheitsblatt VDMA 34179, 2015-03-00: Messvorschrift zur Bestimmung des Energie- und Medienbedarfs von Werkzeugmaschinen in der Serienfertigung.
- Miller, Michael; Bubeck, Steffen; Hufendiek, Kai (2016): Zur Methodik von Effizienzbewertungen im energiewirtschaftlichen Kontext. In: *Z Energiewirtsch* 40 (3), S. 105–125. DOI: 10.1007/s12398-016-0180-9.
- Mittal, K. L.; Jaiswal, Ravi (2015): *Particle Adhesion and Removal*. Hoboken: Wiley (Adhesion and Adhesives). Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1895640>.
- Munoz, A. A.; Sheng, P. (1995): An analytical approach for determining the environmental impact of machining processes. In: *Journal of Materials Processing Technology* 53 (3-4), S. 736–758. DOI: 10.1016/0924-0136(94)01764-R.
- Oertel, Herbert (2017): *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

- Oetjen, Katrin; Willers, Thomas (2018): Qualitätsüberwachung anhand der Schaumbildung. In: *J Oberfl Techn* 58 (7), S. 52–53. DOI: 10.1007/s35144-018-0212-9.
- Olejnik, Stephen F.; Algina, James (1985): A Review of Nonparametric Alternatives To Analysis of Covariance. In: *Eval Rev* 9 (1), S. 51–83. DOI: 10.1177/0193841X8500900104.
- Owens, D. K.; Wendt, R. C. (1969): Estimation of the surface free energy of polymers. In: *J. Appl. Polym. Sci.* 13 (8), S. 1741–1747. DOI: 10.1002/app.1969.070130815.
- Pak, Jeongihm; Wunderlich, Bernhard (2001): Melting and Crystallization of Polyethylene of Different Molar Mass by Calorimetry †. In: *Macromolecules* 34 (13), S. 4492–4503. DOI: 10.1021/ma010195a.
- Paul, Niklas (2014): Theoretische und experimentelle Untersuchungen von Transport- und Grenzflächenphänomenen in mizellaren Flüssig/flüssig-Systemen. Doctoral Thesis. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Pehnt, Martin (Hg.) (2010): Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch. 1., korrigierter Nachdr. Berlin [u.a.]: Springer.
- Popov, Valentin L. (2015): Kontaktmechanik und Reibung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Prandtl, Ludwig; Betz, Albert (2010): Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik. Göttingen: Göttingen University Press (3).
- DIN 69901-5, Januar 2009: Projektmanagement. Online verfügbar unter <http://www.beuth.de/en/standard/din-69901-5/113428752>, zuletzt geprüft am 01.10.2018.
- Prokopovich, Polina; Perni, Stefano (2010): Multiasperity contact adhesion model for universal asperity height and radius of curvature distributions. In: *Langmuir : the ACS journal of surfaces and colloids* 26 (22), S. 17028–17036. DOI: 10.1021/la102208y.
- Prokopovich, Polina; Perni, Stefano (2011): Comparison of JKR- and DMT-based multi-asperity adhesion model: Theory and experiment. In: *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 383 (1-3), S. 95–101. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2011.01.011.
- Prokopovich, Polina; Starov, Victor (2011): Adhesion models: from single to multiple asperity contacts. In: *Advances in colloid and interface science* 168 (1-2), S. 210–222. DOI: 10.1016/j.cis.2011.03.004.
- VDA-Richtlinie 19.1, 03.2015: Prüfung der Technischen Sauberkeit.
- Rabel, W. (1971): Einige Aspekte der Benetzungstheorie und ihre Anwendung auf die Untersuchung und Veränderung der Oberflächeneigenschaften von Polymeren. In: *Farbe und Lacke* 77 (10), S. 997–1005.
- Rabinovich; Adler; Ata; Singh; Moudgil (2000a): Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces. In: *Journal of colloid and interface science* 232 (1), S. 17–24. DOI: 10.1006/jcis.2000.7168.
- Rabinovich; Adler; Ata; Singh; Moudgil (2000b): Adhesion between Nanoscale Rough Surfaces. In: *Journal of colloid and interface science* 232 (1), S. 10–16. DOI: 10.1006/jcis.2000.7167.
- Rajaratnam, N.; Rizvi, S. A. H.; Steffler, P. M.; Smy, P. R. (1994): An experimental study of very high velocity circular water jets in air. In: *Journal of Hydraulic Research* 32 (3), S. 461–470. DOI: 10.1080/00221689409498746.
- RAMAN, C. V. (1923): A Theory of the Viscosity of Liquids. In: *Nature* 111 (2790), S. 532–533. DOI: 10.1038/111532b0.
- Richardson, Lewis F. (1961): The problem of contiguity: an appendix to statistics of deadly quarrels. In: *General systems yearbook* 6, S. 139–187.
- ISO 16232, 12.2018: Road vehicles - Cleanliness of components and systems.
- ISO 16232-10, 06.2007: Road vehicles — Cleanliness of components of fluid circuits.
- Rochowicz, Markus (2018): Elektromobilität und Technische Sauberkeit. In: *J Oberfl Techn* 58 (S1), S. 10–14. DOI: 10.1007/s35144-018-0118-6.

- Rosen, Milton J.; Kunjappu, Joy T. (2012): Surfactants and interfacial phenomena. 4th ed. Hoboken, N.J.: Wiley (Engineering professional collection). Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10529325>.
- Saffman, P. G. (1965): The lift on a small sphere in a slow shear flow. In: *J. Fluid Mech.* 22 (02), S. 385. DOI: 10.1017/S0022112065000824.
- Sauer, Joachim (1989): Molecular models in ab initio studies of solids and surfaces: from ionic crystals and semiconductors to catalysts. In: *Chem. Rev.* 89 (1), S. 199–255. DOI: 10.1021/cr00091a006.
- Schach, W. (1935): Umlenkung eines kreisförmigen Flüssigkeitsstrahles an einer ebenen Platte senkrecht zur Strömungsrichtung. In: *Ing. arch* 6 (1), S. 51–59. DOI: 10.1007/BF02086410.
- Schade, Heinz; Kunz, Ewald; Kameier, Frank (2007): Strömungslehre. 3., Neubearb. Aufl. [Elektronische Ressource]. Berlin: DE GRUYTER (De-Gruyter-Lehrbuch). Online verfügbar unter <http://www.reference-global.com/doi/book/10.1515/9783110189728>.
- Scheiff, Frederik (2015): Fluidodynamik, Stofftransport und chemische Reaktion der Suspensionskatalyse bei der Flüssig/flüssig-Pfropfenströmung in Mikrokanälen. Dissertation. Technische Universität Dortmund, Dortmund.
- Schlichting, H.; Gersten, K. (2006): Grenzschicht-Theorie. Unter Mitarbeit von E. Krause und H. Oertel Jr. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schmauz, Günther (2010): Verfahren zur Klassifizierung von Partikeln in der Automobilindustrie mittels Lumineszenzspektroskopie. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- Schmid, Christiane (2004): Energieeffizienz in Unternehmen. Eine handlungstheoretische und wissensbasierte Analyse von Einflussfaktoren und Instrumenten. Zugl.: Zürich, Diss., Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 15398, 2004. Zürich.
- Schrems, Sebastian (2014): Methode zur modellbasierten Integration des maschinenbezogenen Energiebedarfs in die Produktionsplanung. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014. Aachen: Shaker (Schriftenreihe des PTW).
- Schuler, Peter (2014): Einfluss von Grenzflächeneffekten auf den Dichtmechanismus der Radial-Wellendichtung. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014. Stuttgart: IMA (Berichte aus dem Institut für Maschinenelemente, 153).
- Schulz, Doris (2017): Flexibilität, Kosten und Industrie 4.0 im Blick. In: *J Oberfl Techn* 57 (S2), S. 6. DOI: 10.1007/s35144-017-0099-x.
- Schulz, Doris (2018): Effizienzsteigerung in der Bauteilreinigung. In: *J Oberfl Techn* 58 (10), S. 34–37. DOI: 10.1007/s35144-018-0296-2.
- Schulze, Lothar (2017): Checkliste zur Planung eines Reinigungsprozesses. Anlage, Verfahren, Chemie und Peripherie. Unter Mitarbeit von R. Jung, M. Mitschke und B. Stelzer. Hg. v. FiT Fachverband industrielle Teilereinigung e.V. Fachausschuss Reinigen. Hilden. Online verfügbar unter https://fit.zvo.org/fileadmin/fit2/PDFs_allgemein/Leitlinien_Checklisten/FiT_Broschuere_Checkliste_Web.pdf, zuletzt geprüft am 09.10.2018.
- Schulze, Lothar (2018): QSRein 4.0 — Chancen für die Reinigungstechnik. In: *J Oberfl Techn* 58 (S1), S. 20–21. DOI: 10.1007/s35144-018-0120-z.
- SCHWARCZ, H. P.; SHANE, K. C. (1969): MEASUREMENT OF PARTICLE SHAPE BY FOURIER ANALYSIS. In: *Sedimentology* 13 (3-4), S. 213–231. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1969.tb00170.x.
- Shang, Jianying; Flury, Markus; Harsh, James B.; Zollars, Richard L. (2008): Comparison of different methods to measure contact angles of soil colloids. In: *Journal of colloid and interface science* 328 (2), S. 299–307. DOI: 10.1016/j.jcis.2008.09.039.
- Sigloch, Herbert (2017): Technische Fluidmechanik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sinner, Herbert (1960): Über das Waschen mit Haushaltswaschmaschinen. In: *Haus+ Heim-Verlag, Hamburg*.
- Song, You Young; Bhadeshia, H.K.D.H.; Suh, Dong-Woo (2015): Stability of stainless-steel nanoparticle and water mixtures. In: *Powder Technology* 272, S. 34–44. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.11.026.

- Spurk, Joseph H. (1992): Dimensionsanalyse in der Strömungslehre. Berlin: Springer.
- Stephan, Peter; Schaber, Karlheinz; Stephan, Karl; Mayinger, Franz (2010): Thermodynamik. Band 2: Mehrstoffsysteme und chemische Reaktionen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Stephan, Peter; Stephan, Karl; Schaber, Karlheinz; Mayinger, Franz (2013): Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen. Band 1: Einstoffsysteme. 19., erg. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch).
- Stieß, Matthias (2009): Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Strauss, Karl (2016): Kraftwerkstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Tabor, D. (1977): Surface forces and surface interactions. In: *Journal of colloid and interface science* 58 (1), S. 2–13. DOI: 10.1016/0021-9797(77)90366-6.
- VDA-Richtlinie 19.2, 2010: Technische Sauberkeit in der Montage.
- Thiede, Sebastian (2012): Energy efficiency in manufacturing systems. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2011. Berlin: Springer (Sustainable production, life cycle engineering and management). Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1409/2012935578-d.html>.
- Tomas, Jürgen (2007): Adhesion of ultrafine particles – A micromechanical approach. In: *Chemical Engineering Science* 62 (7), S. 1997–2010. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.055.
- Trunz, Peter (2013): Technische Sauberkeit in der Elektrotechnik. Leitfaden. Unter Mitarbeit von T. Bartsch, J. Frey, O. Gropp, H. Hundt, M. Nikolussi, F. Petri et al. Hg. v. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V. Fachverband PCB and Electronic Systems. Frankfurt am Main. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2013/Okttober/Leitfaden_Technische_Sauberkeit_in_der_Elektrotechnik/Technische-Sauberkeit-in-Elektrotechnik-ZVEI-Leitfaden-rev-2016.pdf, zuletzt geprüft am 08.10.2018.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (2015): ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT. Online verfügbar unter https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf, zuletzt geprüft am 18.12.2018.
- Urbakh, Michael; Klafter, Joseph; Gourdon, Delphine; Israelachvili, Jacob (2004): The nonlinear nature of friction. In: *Nature* 430, 525 EP -. DOI: 10.1038/nature02750.
- VDI e.V. (Hg.) (2013): VDI-Wärmeatlas. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Vitos, L.; Ruban, A. V.; Skriver, H. L.; Kollár, J. (1998): The surface energy of metals. In: *Surface Science* 411 (1-2), S. 186–202. DOI: 10.1016/S0039-6028(98)00363-X.
- Wadell, Hakon (1935): Volume, Shape, and Roundness of Quartz Particles. In: *The Journal of Geology* 43 (3), S. 250–280. DOI: 10.1086/624298.
- Warnecke, G.; Hummel, G. (1977): Zerspanen metallischer Werkstoffe. Aufbauschneidenbildung - Schnittvorgang im Feingefüge. Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw. Tonfilm, 10,5 min.
- Wennerström, H. (1979): Micelles. Physical chemistry of surfactant association. In: *Physics Reports* 52 (1), S. 1–86. DOI: 10.1016/0370-1573(79)90087-5.
- Wildbrett, G. (2006): Chemische Verfahren zur Reinigung und Sterilisation von Aseptikanlagen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 78 (11), S. 1623–1632. DOI: 10.1002/cite.200600096.
- Worms, Martin J.; Radermacher, Franz J. (2018): Klimaneutralität – Hessen 5 Jahre weiter. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Wu, K.-J.; Reitz, R. D.; Bracco, F. V. (1986): Measurements of drop size at the spray edge near the nozzle in atomizing liquid jets. In: *Phys. Fluids* 29 (4), S. 941. DOI: 10.1063/1.865689.

Wu, Souheng (1971): Calculation of interfacial tension in polymer systems. In: *J. polym. sci., C Polym. symp.* 34 (1), S. 19–30. DOI: 10.1002/polc.5070340105.

Wullstein, Mathias (2004): Auswahl und optimale Auslegung industrieller Bauteilreinigungsanlagen. Universität Dortmund. Online verfügbar unter <https://eldorado.tu-dortmund.de/bitstream/2003/2802/1/Wullsteinunt.pdf>.

Yoon, Hae-Sung; Kim, Eun-Seob; Kim, Min-Soo; Lee, Jang-Yeob; Lee, Gyu-Bong; Ahn, Sung-Hoon (2015): Towards greener machine tools – A review on energy saving strategies and technologies. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 48, S. 870–891. DOI: 10.1016/j.rser.2015.03.100.

Zhu, Yakun; Free, Michael L.; Woollam, Richard; Durnie, William (2017): A review of surfactants as corrosion inhibitors and associated modeling. In: *Progress in Materials Science* 90, S. 159–223. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.07.006.

Zlatev, Metodi: Beitrag zur quantitativen Kornformcharakterisierung unter besonderer Berücksichtigung der digitalen Bildaufnahmetechnik. Freiberg, TU Bergakademie, Diss., 2005. Online verfügbar unter <https://katalog.ub.tu-freiberg.de/Record/0002835958>.

B Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Strompreisentwicklung in Deutschland für die Industrie; bei einem Jahresbedarf zwischen 0,16 - 20 GWh	1
Abb. 1-2: Spezifischer Energieaufwand verschiedener Fertigungsverfahren	2
Abb. 2-1: Wichtige Meilensteine der Automobilproduktion und die wachsende Bedeutung der Bauteilreinigungsprozesse	4
Abb. 2-2: Checkliste zur Planung eines Reinigungsprozesses	5
Abb. 2-3: Gründe für ein Reinigungsverfahren unter befragten Unternehmen	6
Abb. 2-4: Angewendete Reinigungsverfahren; Mehrfachnennung möglich	7
Abb. 2-5: Übersicht und Einteilung der Anlagentechnik für die industrielle Reinigung	7
Abb. 2-6: Einteilung der Reinigung als Fertigungsverfahren	9
Abb. 2-7: Struktur eines webbasierten Fachinformationssystems darin enthaltene Arbeitsweise der Datenbanken für die Simulation des Reinigungsverfahrens und Auswahl geeigneter Reinigungsanlagen	10
Abb. 2-8: Entwicklung des Endenergiebedarfs nach Sektoren in Deutschland; Stand Sept. 2017	11
Abb. 2-9: Anteile des Energiebedarfs des Sektor Industrie, darin enthalten die Metallverarbeitung und Reinigungsverfahren	12
Abb. 2-10: Schematische Darstellung der als Energieeffizienzlücke bezeichneter Niveauunterschied zwischen dem IST-Stand der Energieeffizienz und einem erreichbaren, optimierten System	12
Abb. 2-11: Sinnerscher Kreis	17
Abb. 2-12: Anwendungsmöglichkeiten von Kenngrößen	19
Abb. 2-13: Zusammenwirken der sich ergänzenden Standards der ISO 50000-Familie	20
Abb. 2-14: Beziehung zwischen der energiebezogenen Leistung, EnPIs (Energieleistungskennzahlen), EnBs und operativen Energiezielen	20
Abb. 3-1 Formalisierung der Unterscheidungsmerkmale für eine Energieeffizienzbewertung von Bauteilreinigungsanlagen	26
Abb. 3-2: Verschiedene geeignete Bilanzräume (A-D) für die Bewertung der Energieeffizienz der Bauteilreinigung	29
Abb. 3-3: Schalenmodell der unterschiedlichen Energieaufwandbezugsniveaus	31
Abb. 3-4: Zwei Bauteile mit einer Verunreinigung; der Partikel auf dem rechten Bauteil kann durch das Totgebiet der Strömung nicht entfernt werden	35
Abb. 3-5: Übersicht der verschiedenen Nutzergruppen von Energieeffizienzbewertungen einer Produktionsanlage	36
Abb. 3-6: Bewertungssystematik und deren Anwendung für Nutzer und Hersteller von Reinigungsanlagen (in blaugefärbten Kreisen sind die Kapitel- und Unterkapitelnummern dieser Arbeit angegeben)	40
Abb. 4-1: Vorgehen zur Berechnung des Energetisch-Physikalischen Minimums für die Bauteilreinigung	42

Abb. 4-2: Übersicht der unterschiedlichen Verunreinigungsarten und ihrer relativen Häufigkeit unter befragten Anwendern von industrieller Reinigung	43
Abb. 4-3: Aufnahme des Werkstückeingriffs in die Werkstückoberfläche und Umformung des Gefüges in einen Span (li.); Auflicht- und Elektronenmikroskopieaufnahme eines Lamellenspanns (re.).....	45
Abb. 4-4: Beispielfertigungskette mit Zerspanoperationen und Reinigungsstufen zur Entfernung der Verunreinigungen.....	46
Abb. 4-5: Kontinuumsmechanik, Mikromechanik, Molekulardynamik im Falle einer wässrigen Reinigung	48
Abb. 4-6: Bindungseffekte	48
Abb. 4-7: Vereinfachte Darstellung des Lennard-Jones-Potenzials.....	51
Abb. 4-8: Schematische Darstellung des Hertzschen Kontakts von zwei Kugeln a) und einer starren Kugel mit einem elastischen Halbraum b)	53
Abb. 4-9: Schematische Darstellung der freien Oberflächenenergie kondensierter Materie	54
Abb. 4-10: Schematische Darstellung der Rauheiten und geometrischen Größen zur mathematischen Beschreibung des Partikelkontakts mit einer Oberfläche, wobei es keinen Unterschied macht, ob dem Partikel oder der Oberfläche (oder ggf. einer Resultierenden aus beiden) eine Rauheit zugewiesen wird	57
Abb. 4-11: a) Flüssigkeitstropfen auf einer Festkörperoberfläche; b) Flüssigkeitstropfen von der Oberfläche getrennt; Indizes: S=solid (fest), L=liquid (flüssig), G=gas (gasförmig).....	58
Abb. 4-12: Ausbildung eines Meniskus beim adhäsiven Kontakt von Partikel und Ölfilm auf einer festen Oberfläche (li.); (re.) die wichtigsten geometrischen Größen zur mathematischen Beschreibung	60
Abb. 4-13: Ablauf zur Erstellung einer Sauberkeitsspezifikation.....	61
Abb. 4-14: Maximale Anzahl an Partikeln für die einzelnen Konzentrationsklassen; die Ordinatenachse ist logarithmisch skaliert	63
Abb. 4-15: Prüfverfahren zur technischen Sauberkeit	64
Abb. 4-16: Schema der Wilhelmy Methode; Eine Platte der Breite d wird in die Flüssigkeit getaucht. Die benötigte Kraft F zum Eintauchen wird gemessen.	65
Abb. 4-17: Kontaktwinkelmessung	66
Abb. 4-18: Schematische Darstellung der verschiedenen Rauheiten zur Beurteilung der Oberflächenstruktur von Drehteilen	67
Abb. 4-19: Systematik zur Beschreibung der Kornform eines Einzelpartikels	68
Abb. 4-20: Darstellung der maximalen Feretdurchmesser von unterschiedlichen Partikeln; die Aufnahmen weisen unterschiedliche Vergrößerungen auf.....	69
Abb. 4-21: Konturkreis und Innenkreise; grün markiert die Hüllkurve aus Tangenten an den Konturkreisen	70
Abb. 4-22: Nahaufnahme der Oberflächenstruktur durch mehrstufiges Hineinzoomen ausgerichtet auf die Seitenkanten der Partikel.....	72
Abb. 4-23: Neu eingefärbte Rasterelektronenmikroskopieaufnahme mit erhöhtem Schwarz/Weiß-Kontrast; die Halbkreise stellen die doppelten Radien der Asperiten dar	72
Abb. 4-24: Dichtefunktion (z-transformiert) und Verteilungsfunktion der Asperitenradien aus Abb. 4-23	73

Abb. 4-25: Partikelzählung für ein Bauteil vor und nach der Reinigung	74
Abb. 4-26: Haftkräfte Partikel verschiedener Durchmesser über die Feinrauheit r_{ms2}	76
Abb. 4-27: Adhäsive Gesamtkräfte und die Summenkurve der einzelnen Partikelklassen.....	78
Abb. 5-1: Vorgehen zur Berechnung des energetisch-technologischen Minimums für die Bauteilreinigung	80
Abb. 5-2: Kräftegleichgewicht an einem Partikel im Fluidstrom; die dreidimensionale Darstellung dient der Anschauung – es reicht eine mathematische Beschreibung in der Ebene mit zwei Koordinatenrichtungen.....	83
Abb. 5-3: Widerstandsbeiwert c_W in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl; markiert sind die drei wesentlichen Strömungsregime I-Stokes-Bereich, II-Übergangsbereich, III-Newton-Bereich	86
Abb. 5-4: Geschwindigkeitsprofil in der laminaren Grenzschicht	88
Abb. 5-5: Schematische Darstellung einer Mizelle aus Tensidmolekülen mit „gelöster“ Ölphase und Wasser als Dispersionsmedium	89
Abb. 5-6: a) Grenzkurve zur Mizellbildung über der Temperatur; b) Chemisches Potenzial eines Tensids mit Krafft-Point bzw. Trübungspunkt	93
Abb. 5-7: Schematische Darstellung eines umgelenkten Prallstrahls mit ebener Staupunktströmung	95
Abb. 5-8: Darstellung der Stauzone einer ebenen Staupunktströmung mit den Isobaren gleicher Druckverhältnisse p/p_0 und den jeweiligen Maxima der Isotachen der Geschwindigkeitsverhältnisse v/v_F	96
Abb. 5-9: Prinzipskizze eines Freistrahls; die Aufweitung des Strahls ist stark überzeichnet.....	99
Abb. 5-10: Veränderung der maximalen Fluidgeschwindigkeit der Strahlachse ($r=0$) in Abhängigkeit zum Düsenöffnungsabstand	100
Abb. 5-11: Stromlinien an einer scharfen Kante und sich bildende Wirbelgebiete in den Toträumen.....	101
Abb. 5-12: Hydrodynamische Bedingungen in Abhängigkeit von der Partikelgröße; F_{hydro} bedeutet die Summe aus den Bindungskräften und Gewichtskräften	104
Abb. 5-13: Vergleich der Umlenkradien bei einer Düse (li.) und zwei Düsen (re.)	106
Abb. 5-14: Verlauf der kinetische Energie in Abhängigkeit des Abstands von der Strahlmitte aus; r_t ist berechnet nach Gleichung (5-19) und gibt den Abstand der ausgebildeten Grenzschicht an	107
Abb. 6-1: Vorgehen zur Berechnung des energetisch-realen Minimums und Ableitung der theoretischen Berechnungsmodelle als Validierungsbasis für den gemessenen Energiebedarf	110
Abb. 6-2: Düsenkennlinie einer Vollstrahldüse mit einem Durchmesser der Düsenöffnung von $D_0 = 1,65 \text{ mm}$..	112
Abb. 6-3: Am häufigsten eingesetzte Trocknungsverfahren	114
Abb. 6-4: Prinzipskizze einer Reinigungsmaschine mit den energetisch-relevanten Stoff- und Energieflüssen..	118
Abb. 6-5: Ablauf der Energiebilanzierung nach dem ersten Hauptsatz	120
Abb. 6-6: Schematische Darstellung der Energietransporte durch Wärmeleitung an einer Reinigungsmaschine	121
Abb. 6-7: Schematische Darstellung des konvektiven Wärmetransports an der Maschinenoberseite	122
Abb. 6-8: Schema der Wärmeströme durch Wärmestrahlung; im Legendenfenster sind die geometrischen Größen zur Bestimmung der Sichtfaktoren.....	126

Abb. 6-9: Beispielhafte Ergebnisdarstellung für die Energiebilanz einer Reinigungsmaschine ohne Bauteile	129
Abb. 6-10: Energiebilanz für das System Reinigungskammer mit den Energieflüssen und den wesentlichen Variablen und Parameter	130
Abb. 6-11: Schematische Darstellung einer wässrigen Reinigungsanlage und der Nennung der wesentlichen funktionellen Komponenten	131
Abb. 6-12: Verbrauchsgruppen orientierte Struktur einer Reinigungsmaschine untergliedert in drei Funktionsgruppen, die verschiedene Baugruppen (aufgebaut aus verschiedenen Komponenten) zusammenfassen	132
Abb. 6-13: Nennleistung einzelner Komponenten und deren Anteil an der Anschlussleistung der Gesamtmaschine	133
Abb. 6-14: Zustandsbeschreibung der Nutzungsprofile der Verbrauchsgruppen	134
Abb. 6-15: Einfluss- und Störgrößen der wässrigen Bauteilreinigung.....	135
Abb. 6-16: Wärmebedarf einer Reinigungsmaschine über einen Nutzungszeitraum von 8 Stunden.....	136
Abb. 6-17: Gemessene Umgebungstemperatur der jeweiligen thermischen Leistungsaufnahme; gemittelt über 30 Minuten.....	137
Abb. 7-1: Prozesskette ETA-Fabrik	138
Abb. 7-2: Computergenerierte Darstellung der Steuerscheibe; Gelb markiert ist die Funktionsfläche	140
Abb. 7-3: 3D-Profil und Längsschnitt des Oberflächenprofils	140
Abb. 7-4: Gemessene Rauheiten verschiedener Werkstückgruppen	141
Abb. 7-5: Masse der filmischen Verunreinigungen normiert auf eine Bauteiloberfläche von 1000 cm ²	142
Abb. 7-6: Partikelanzahl in Abhängigkeit von verschiedenen Medientemperaturen	142
Abb. 7-7: Reinigungsmaschine.....	143
Abb. 7-8: Leistungsaufnahme einer Reinigungsmaschine über einen Reinigungszyklus	145
Abb. 7-9: Variable Leistungsaufnahme: Trocknungsaggregate Seitenkanalverdichter und Heizregister (li.); Spritzdruckpumpe des Medientanks 2 (re.)	146
Abb. 7-10: Leistungsaufnahme einer Dauermessung der Reinigungsmaschine über 10 Produktionsschichten à 8 Stunden	147
Abb. 7-11: Verlauf des Wärmestroms über den Wärmeübertrager in die Reinigungsmaschine (li.) und die berechneten durchschnittlichen thermischen Leistungen (re.) jeweils für ein Reinigungsprogramm bei 50 °C, 60 °C und 68 °C.....	148
Abb. 7-12: Thermischer Leistungsbedarf zum Halten der Medientemperatur auf 60 °C beispielhaft für den Medientank 1	149
Abb. 7-13: Polynomialfläche anhand der gemessenen Tanktemperatur und Raumtemperatur als Ergebnis einer polynomialen Regression zehnten Grades	151
Abb. 7-14: Polynomialfläche anhand der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme und Raumtemperatur als Ergebnis einer polynomialen Regression zehnten Grades	152

Abb. 7-15: Polynomialfläche anhand der gemessenen Temperaturdifferenz zwischen Versorgungsnetz- und Tanktemperatur und Raumtemperatur als Ergebnis einer polynominalen Regression zehnten Grades	153
Abb. 7-16: Energiebedarf der Reinigungsmaschine in einer Produktion mit einer Auslastung von 40 %; der momentane Energiebedarf hat die zeitliche Auflösung eines Reinigungszyklus von 1100 s	154
Abb. 7-17: Energieflüsse in Form der verschiedenen Energieterne technische Arbeit, Wärme und Enthalpie...	157
Abb. 7-18: Verteilung der negativen Energieflüsse über die Systemgrenze	158
Abb. 7-19: Bilanz der Energieflüsse über die Systemgrenze der Reinigungskammer	159
Abb. 7-20: Sankey-Diagramm der Energieflüsse über die Systemgrenze Reinigungsmaschine	159
Abb. 7-21: Aufnahme der Reinigungskammer und Medienzuführung (li.) mit den Einstrahldüsen (re.)	161
Abb. 7-22: Abnahme der kinetischen Energie über den radialen Abstand auf der Bauteiloberfläche; $r=0$ entspricht der Freistrahllängsachse	163
Abb. 7-23: Bindungskräfte und Gewichtskräfte der Partikelanalyse; in Großbuchstaben gekennzeichnet sind die Partikelgrößenklassen nach Tab. 4-1	165
Abb. 7-24: Die hydrodynamische Kraft ergibt sich als Summe der Adhäsions-, - der Gewichts und Kapillarkraft .	166
Abb. 7-25: Vergleich der Energieeffizienzen der Maschine (EEV_R), der Technologie (EEV_T) und der physikalischen Basis (EEV_P); die Achse der Energieeffizienzen hat eine logarithmische Skalierung	168
Abb. 7-26: Energieeffizienzwerte und zugeordnete Energieminima; Strichlinien zeigen die Benchmark-Werte für die Reinigungsmaschine und das Reinigungsverfahren – die Nummerierung entspricht der in Tab. 7-27	170
Abb. 8-1: Datenblatt der Versuchsreinigungsanlage JAVA.....	194
Abb. 8-2. Technische Daten der Versuchsmaschine.....	195
Abb. 8-3: Berechnungsschema zur Bestimmung des Wärmetransports durch Wärmeleitung	196
Abb. 8-4: Berechnungsschema zur Bestimmung des konvektiven Wärmetransports.....	197
Abb. 8-5: Berechnungsschema zur Ermittlung der Wärmestrahlung	201
Abb. 8-6: Messstellenplan zur Kalibrierung der Thermografietemperaturmessungen	205
Abb. 8-7: Berechnungsschema zur Ermittlung der Enthalpie feuchter Luft	206
Abb. 8-8: Analysierte Bauteile	212
Abb. 8-9: Chemischer Rückstand und IR-Spektroskopieanalyse	212
Abb. 8-10: Kennfeld Lowara 15SV08F075T; eingezeichneter Betriebspunkt nach Druckmessung.....	213
Abb. 8-11: Übersicht des Systemidentifikationstools auf Basis des CRISP-DM	214
Abb. 8-12: Prognosewerte für die elektrische Leistung anhand der Lerndaten im Knime-Tool, eigene Darstellung 2018.....	215

C Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Zusammenfassung von Einflussfaktoren auf Energiekennzahlen verschiedener Produktionsmaschinen und Produktionsinfrastruktur	18
Tab. 2-2: Übersicht der bisherigen Forschungsansätze und Einordnung der vorliegenden Arbeit	21
Tab. 3-1: Auflistung der Schalenbezeichnung und der Bilanzierungsbeziehungen in der Effizienzbewertung	32
Tab. 4-1: Partikelgrößenklassen	63
Tab. 4-2: Oberflächenspannungen verschiedener Werkstoffe	66
Tab. 4-3: Materialparameter und gemessene geometrische Größen der Partikel	75
Tab. 4-4: Berechnung des Tabor-Parameters	75
Tab. 4-5: Berechnung der Adhäsionskräfte für ein Einzelpartikel und summiert pro Partikelgrößenklasse	75
Tab. 4-6: Ergebnisse der Restschmutzanalyse; beim Schmierstoff bei der Zerspanung handelt es sich um emulgierte KSS auf Mineralölbasis	77
Tab. 4-7: Adhäsionsarbeit und Bindungsenergie der filmischen Verunreinigung	77
Tab. 4-8: Berechnung der Bindungskräfte der Partikel	77
Tab. 4-9: Berechnung des EPM für das Beispielbauteil	78
Tab. 5-1: Berechnungsvorschriften für den Widerstandsbeiwert in unterschiedlichen Strömungsregimen	86
Tab. 5-2: Größenordnung der Diffusionskoeffizienten für unterschiedliche Aggregatsysteme	91
Tab. 5-3: Viskosität η von Wasser bei verschiedenen Temperaturen	92
Tab. 5-4: Beispielhafte Partikelgrößenverteilung	103
Tab. 5-5: Parameter zur Bestimmung der Fluidgeschwindigkeiten	103
Tab. 5-6: Mindestgeschwindigkeiten zum Lösen der Partikel durch die Wirkung der Saffmann-Kraft und Widerstandskraft	103
Tab. 5-7: Kinetische Energie der Partikelgrößenklassen	105
Tab. 5-8: Erforderliche kinetische Energie zum Lösen der Bindungsenergie der Partikel	105
Tab. 5-9: Berechnung der benötigten Freistrahlggeschwindigkeit	106
Tab. 5-10: Parameter zur Berechnung des Stofftransports	107
Tab. 5-11: Benötigte Dauer für den Stofftransport der filmischen Verunreinigung in wässriger Lösung durch ein Tensid	108
Tab. 5-12: Berechnung des ETM	108
Tab. 6-1: Absteigende Sortierung der Komponentennennleistung einer beispielhaften Reinigungsmaschine	133
Tab. 7-1: Kenngrößen und Merkmale des Versuchsbauteils	139
Tab. 7-2: Restschmutzanalyse der Referenzfertigung jeweils vor und nach der Reinigung	141
Tab. 7-3: Reinigungssequenzabfolge des beispielhaften Reinigungszyklus mit Angabe der tatsächlichen Dauer, der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme und dem Nutzungsprofil der Verbrauchsgruppe	145

Tab. 7-4: Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme für einen Reinigungszyklus	147
Tab. 7-5: Leistungsaufnahme bei verschiedenen energetischen Maschinenzuständen	148
Tab. 7-6: Wärmestrom für den Haltebetrieb der Reinigungsmedien auf 60 °C	150
Tab. 7-7: Wärmebedarf der zu reinigenden Bauteile	150
Tab. 7-8: Berechnung des EBM	153
Tab. 7-9: Parameter als Randbedingungen der Analyse	155
Tab. 7-10: Wärmeleistung durch Wärmeleitung	155
Tab. 7-11: Wärmeleistung durch konvektiven Wärmetransport	156
Tab. 7-12: Wärmeleistung durch Strahlungsaustausch	156
Tab. 7-13: Enthalpiebilanz über einen Reinigungszyklus	156
Tab. 7-14: Energiebilanz der Reinigungsmaschine aufgeschlüsselt für jede Programmsequenz; alle Angaben in J	156
Tab. 7-15: Berechnung der Differenz aus den Energiebilanzen für Reinigungsmaschine und -kammer	160
Tab. 7-16: Berechnung der Energieeffizienz der Produktionsanlage EEV_R	160
Tab. 7-17: Berechnungsparameter für die kinetische Energie des Fluidstroms	161
Tab. 7-18: Berechnung der Strömungsbedingungen im Freistrah und auf dem Bauteil	162
Tab. 7-19: Kinetische Energie der Spritzstrahlen	163
Tab. 7-20: Erforderliche kinetische Energie zum Lösen der Verunreinigung, s. Tab. 5-7	163
Tab. 7-21: Berechnung der technologischen Energieeffizienz	164
Tab. 7-22: Materialparameter	164
Tab. 7-23: Gemessene Parameter der filmischen Verunreinigungen	165
Tab. 7-24: EPM der Reinigung einer Steuerscheibe	167
Tab. 7-25: Berechnung der physikalischen Energieeffizienz	167
Tab. 7-26: Relationen der EEV zueinander	168
Tab. 7-27: Verschiedene Energie-Benchmarks für die Versuchsanlage	169
Tab. 8-1 Berechnung der Wärmeleitung der Reinigungsmaschine	196
Tab. 8-2 Messwerte und Parameter zur Berechnung der Konvektion	198
Tab. 8-3 Berechnung der Konvektion auf der Maschinenoberseite (horizontale Fläche)	198
Tab. 8-4 Berechnung der Konvektion auf der Maschinenseitenflächen (vertikale Flächen)	199
Tab. 8-5 Berechnung der Konvektion auf der Maschinenseitenflächen (vertikale Flächen)	200
Tab. 8-6: Parameter zur Berechnung der Wärmestrahlung	201
Tab. 8-7: Sichtfaktoren Oberseite	202
Tab. 8-8: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die Oberseite	202

Tab. 8-9: Sichtfaktoren Vorderseite	202
Tab. 8-10: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die Vorderseite	203
Tab. 8-11: Sichtfaktoren Rückseite.....	203
Tab. 8-12: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die Rückseite ...	203
Tab. 8-13: Sichtfaktoren linke Seite.....	203
Tab. 8-14: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die linke Seite ..	203
Tab. 8-15: Sichtfaktoren rechte Seite	204
Tab. 8-16: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die rechte Seite	204
Tab. 8-17: Parameter zur Enthalpiestromberechnung	207
Tab. 8-18: Berechnung der Enthalpieströme Druckluft, Impulsblasen alternierend	207
Tab. 8-19: Berechnung der Enthalpieströme Druckluft	207
Tab. 8-20: Berechnung der Enthalpieströme Abluft.....	208
Tab. 8-21: Berechnung der Enthalpieströme Abluft (am Ausgang Reinigungskammer).....	208
Tab. 8-22: Berechnung der Enthalpieströme Zuluft.....	208
Tab. 8-23: Berechnung der Enthalpieströme Zuluft (nach Heizregister).....	208
Tab. 8-24: Auswertung der Formanalyse und Feinstruktur der entfernten Partikel aus den Versuchsreihen	209
Tab. 8-25: Aufnahmen der Partikelgrob- und –feinstruktur mit einem Rasterelektronenmikroskopie	210
Tab. 8-26: Fortsetzung von Tab. 8-25	211

D Anhang

D.1 Datenblatt Reinigungsanlage JAVA

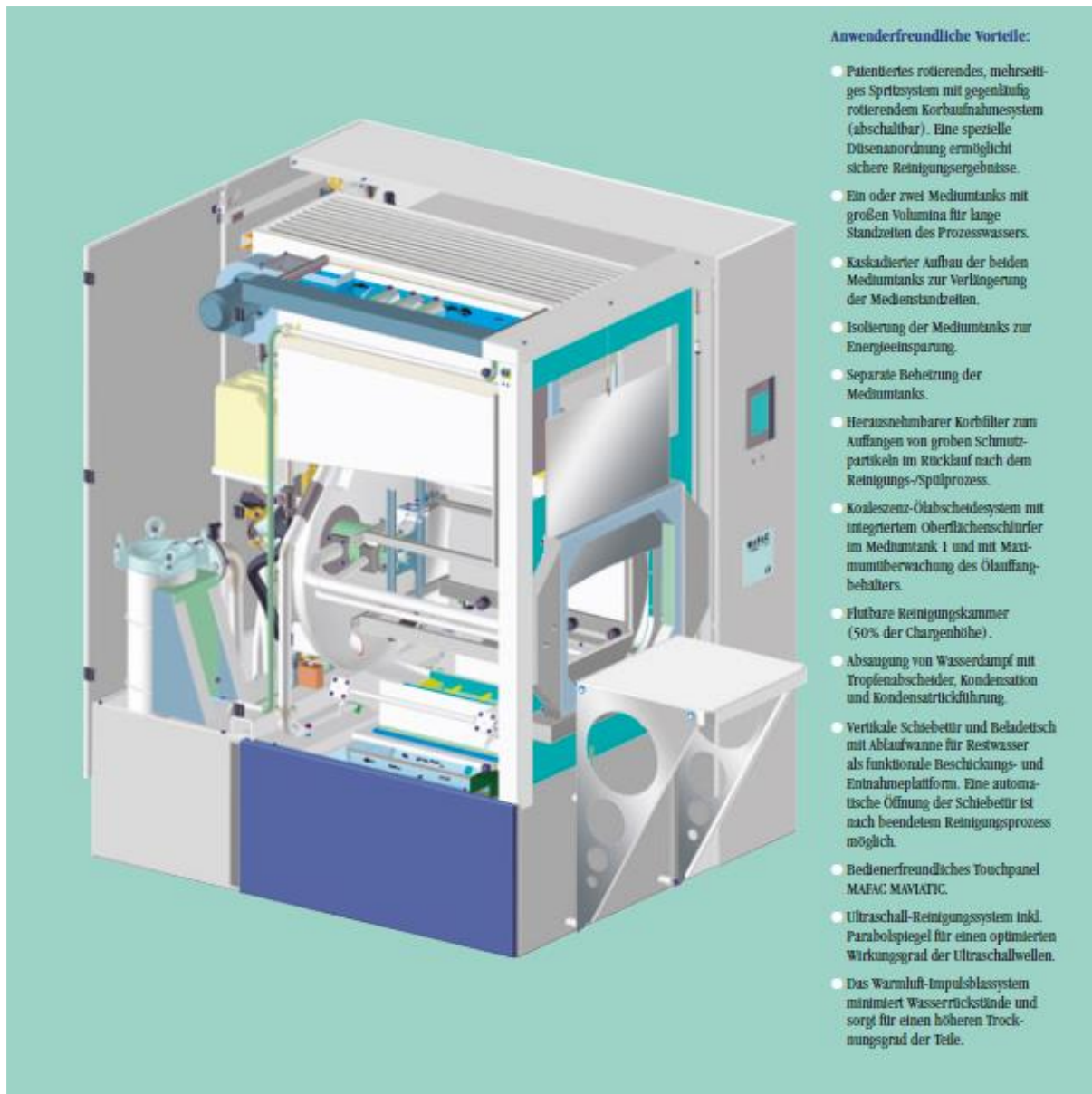


Abb. 8-1: Datenblatt der Versuchsreinigungsanlage JAVA⁴⁶⁹

⁴⁶⁹ Bildquelle: MAFAC - E. Schwarz GmbH & Co. KG

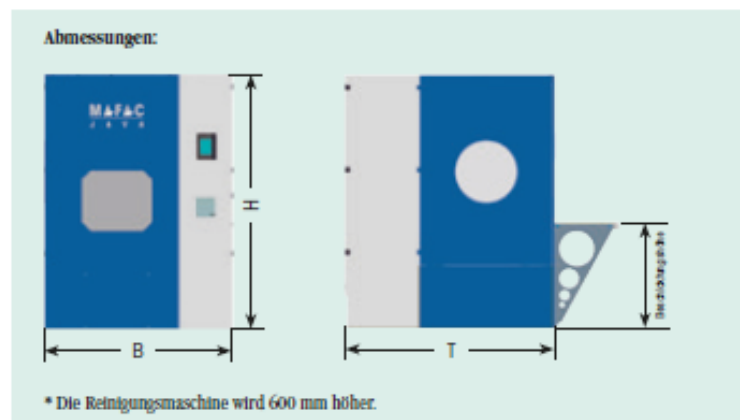
Serienmäßige Merkmale:

- Innovative Maschinenkonzeption für schnelle Wartung und einfachen Service
- Frontbeschickung mit automatisch entriegelbarer Schiebetür
- EURO-Normkörbe einsetzbar (600 x 400 x 288 mm)
- KorbfILTER im Rücklauf
- Mediumheizung mit analoger Temperaturregelung und -begrenzung
- Wärmeschutzisolierung der Mediantanks
- Wasserdampfabsaugung mit Kondensation und Tropfenabscheider
- Koaleszenz-Ölabscheider mit Maximumüberwachung des Ölauffangbehälters
- Medienfüllstandsregelung
- Mediumführende Bauteile in Edelstahl/Kunststoff
- Gesamtvolumen der Maschine inklusive Ölabscheider 830 l
- Spritz-Flut-Reinigen mit 50 % flutbarer Charge
- Bedienerfreundliches Touchpanel
- MAFAC MAVIATIC, 7 Zoll

Optionen:

- Zusätzlicher Spritzprozess mit Mediantank 2
- Arbeitsraumanpassung bis 660 L x 480 B x 338 H (mm)
- Modem zur Fernwartung der Steuerung
- Rotierendes Warmluft-Impulsblasseystem
- Stationäres Heißluft-Trocknungssystem
- Kombiniertes rotierendes Warmluft-Impuls- und Heißluft-Trocknungssystem
- Vakuumtrocknung*
- Hauptstrom-Feinfiltration
- Ultraschall-Reinigungseinheit
- Sichtscheibe mit indirekter Beleuchtung der Reinigungskammer
- Drehzahlsteuerung der Korbbrotation inkl. Wippen
- Programmpaket zur Zeitsteuerung und Medienpflege
- Verstärktes Pumpensystem Mediantank 1
- Auffangwanne nach WHG
- Entleerungspumpe
- Chemiedosierung
- Vollentsalzungseinheit
- Beschickungswagen
- Stationäre Rollenbahn mit durchgehend kugelgelagerten Laufrollen
- Automatisches Transfersystem
- Bedienerfreundliches Touchpanel MAFAC MAVIATIC, 12 Zoll mit grafischer Prozessvisualisierung
- Drehzahlsteuerung der Düsenrotation
- Frequenzgesteuerter Pumpendruck
- Spülwasserpflegemodul
- Gezieltes Reinigen und Trocknen
- Wärmeaustauschmodul MAFAC HEATX
- Größere Versionen auf Anfrage möglich

Spritzdruckpumpe Standardausführung			Rücklauffiltration		Option: Vorlauffiltration	
Volumenstrom	Druck	Leistung	Reinheit	Fläche	Feinheit	Fläche
Reinigungsprozess Mediantank 1:						
335 l/min.	4,5 bar	4,0 kW	150 µm	0,56 m²	100 µm	1x 0,48 m²
Spülprozess Mediantank 2:						
300 l/min.	2,5 bar	1,85 kW	150 µm	0,28 m²	50 µm	1x 0,24 m²
Option: Spritzdruckpumpe verstärkte Ausführung			Rücklauffiltration		Option: Vorlauffiltration	
Volumenstrom	Druck	Leistung	Reinheit	Fläche	Feinheit	Fläche
Reinigungsprozess Mediantank 1:						
370 l/min.	7,5 bar	7,5 kW	150 µm	0,56 m²	100 µm	2x 0,48 m²
			Inhalt	Auftaktzeit	Temperatur	Heizleistung
1 Bad-Ausführung	Mediantank 1, Reinigen:		830 Liter	ca. 2,0 h	max. 75 °C	30,0 kW
2 Bad-Ausführung	Mediantank 1, Reinigen:		540 Liter	ca. 2,0 h	max. 75 °C	15,0 kW
	Mediantank 2, Spülen:		290 Liter	ca. 2,0 h	max. 75 °C	15,0 kW
Anschlüsse:			Elektrik	V ; Ph ; Hz ; kW		400 ; 3 ; 50 ; 45
			Pneumatik	Zoll ; bar		Rp 1/4 ; 5 – 8
			Bruchwasser	Zoll ; bar		Rp 1/4 ; 0,5 – 10
			Abwasser	Zoll		Rp 1 1/2
			Abluft	mm		DN 120
Absaugung/Kondensation:			mittlerer Volumenstrom		600 m³/h	
Ultraschall-Reinigungseinheit:			Propanz	25 kHz	Leistung	1 x 1.500 W
				25 kHz		1 x 2.000 W
				40 kHz		1 x 1.000 W
Trocknungssysteme:			Volumenstrom	Druck	Temperatur	
	Impulsblasesystem		ca. 3100 l/min.	6,0 bar	< 45 °C	
	Heißblasesystem		250 m³/h	0,015 bar	max 90 °C	
	Kombiniertes Impuls-/Heißblasesystem		180 m³/h	0,015 bar	max. 100 °C	
	Vakuumtrocknungssystem		300 m³/h	< 20 mbar		
Abmessungen:			Tiefe (mm)	Breite (mm)	Höhe (mm)	
	Nutzraum max.		660	480	338	
	Außenmaße (T x B x H)		2050	1500	2050	
	Beschickungshöhe				860	
Gewicht:			Charge	max. 100 kg	Option	max. 250 kg
	Basismaschine		ohne Medium	1500 kg		
			mit Medium	2130 kg		
Maschinenfarbe:			Achtung: Farbänderung ab 1.1.2018 Lichtgrau RAL 7035 / Lichtgrün RAL 6027		Lichtgrau RAL 7035	Reflexblau RAL 5007

Abb. 8-2. Technische Daten der Versuchsmaschine⁴⁷⁰⁴⁷⁰ Bildquelle: MAFAC - E. Schwarz GmbH & Co. KG

D.2 Ablauf zur Berechnung des Wärmetransports

D.2.1 Wärmeleitung

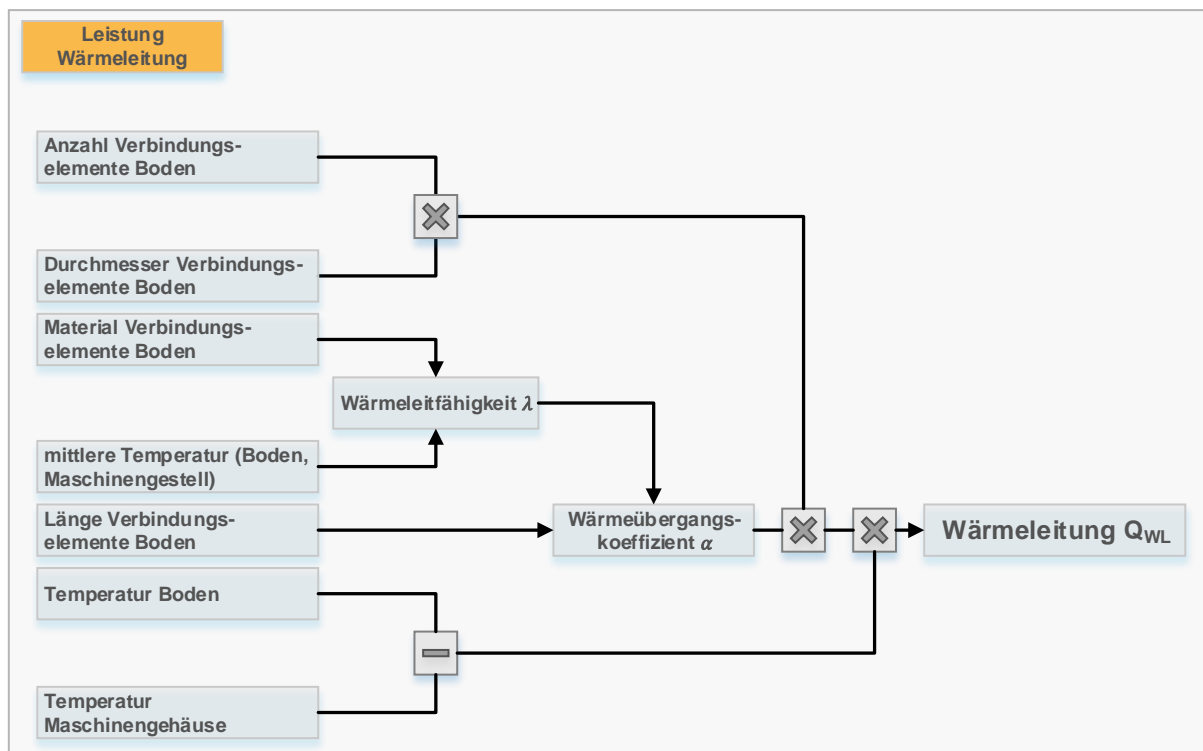


Abb. 8-3: Berechnungsschema zur Bestimmung des Wärmetransports durch Wärmeleitung⁴⁷¹

D.2.2 Evaluierung des ERM: Wärmeleitung

Tab. 8-1 Berechnung der Wärmeleitung der Reinigungsmaschine

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Anzahl "Füße"	n	4		
Wärmeleitfähigkeit Material	$\lambda_{Fu\beta}$	46,5	$[W/(m \cdot K)]$	Stahl
Fläche "Fuß"	$A_{Fu\beta}$	1,26	$(\cdot 10^{-3}) m^2$	
Länge "Fuß"	$s_{Fu\beta}$	0,1	m	
Temperatur Boden	ϑ_{Boden}	20	°C	
Temperatur "Fuß" innen	$\vartheta_{Fu\beta}$	35	°C	
Wärmeleitfähigkeit Luft (25°C)	λ_{Luft}	0,026	$W/(m \cdot K)$	
Wärmeleistung Leitung	\dot{Q}_{WL}	-12,01	W	

⁴⁷¹ Eigene Darstellung.

D.2.3 Konvektion

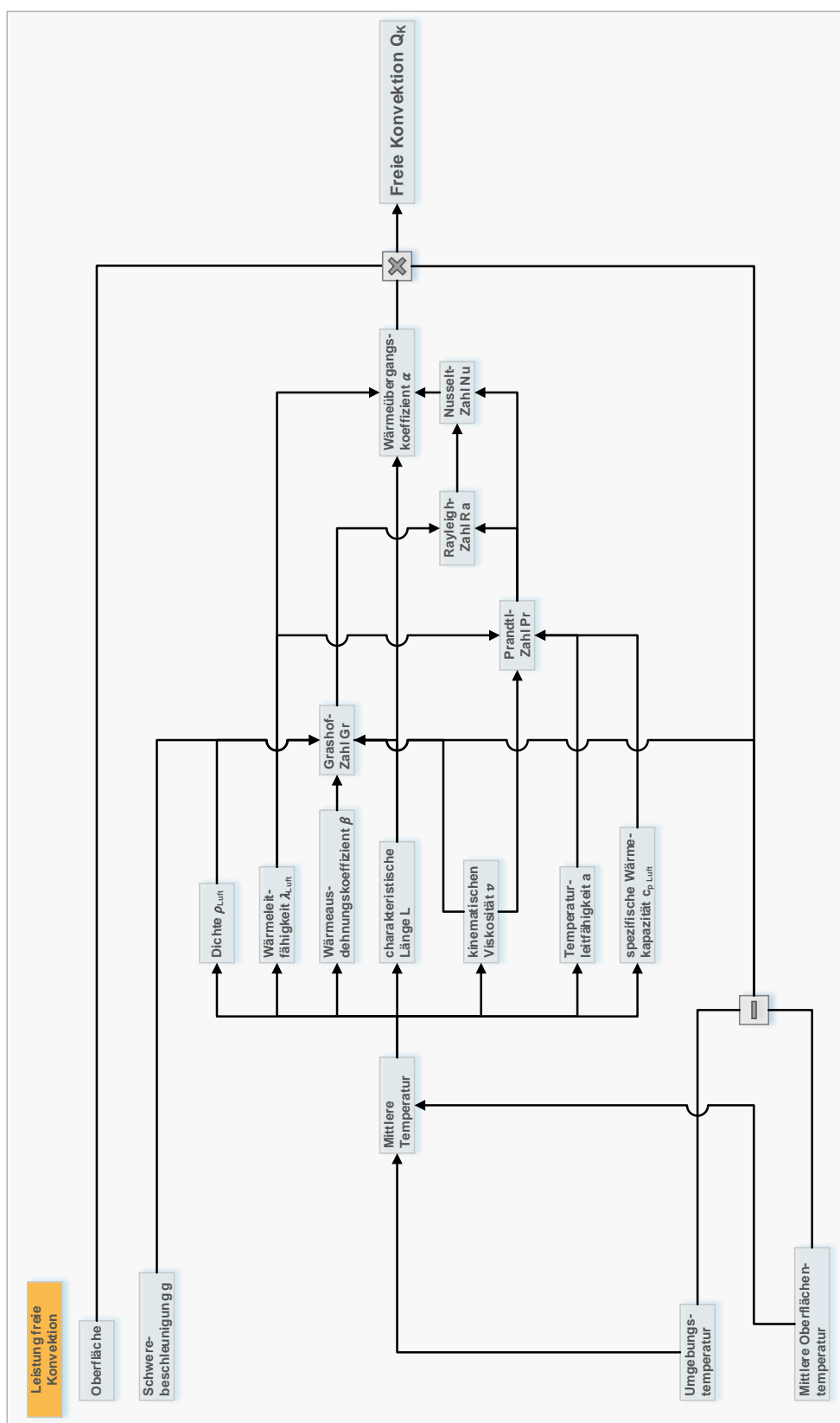


Abb. 8-4: Berechnungsschema zur Bestimmung des konvektiven Wärmetransports⁴⁷²

⁴⁷² Eigene Darstellung.

D.2.4 Evaluierung des ERM: Konvektion

Tab. 8-2 Messwerte und Parameter zur Berechnung der Konvektion

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Temperatur RM Oberseite	$\vartheta_{RM O}$	36,2	[°C]	
Temperatur RM Vorderseite	$\vartheta_{RM V}$	34,3	[°C]	
Temperatur RM Rückseite	$\vartheta_{RM R}$	35,1	[°C]	
Temperatur RM linke Seite	$\vartheta_{RM LS}$	35,2	[°C]	
Temperatur RM rechte Seite	$\vartheta_{RM RS}$	33,8	[°C]	
kinematische Viskosität Luft	ν_L	1,5616	($\cdot 10^{-6}$)[m ² /s]	Bei 30 °C
Temperaturleitfähigkeit	a_{RM}	2,20	($\cdot 10^{-5}$)[m ² /s]	Bei 30 °C
Wärmeleitfähigkeit	λ_{RM}	2,6606	($\cdot 10^{-2}$)[W/(m·K)]	Bei 30 °C
Dichte Luft	ρ_L	1,1644	[kg/m ³]	
spezifische Wärmekapazität	c_P	1080	[J/(kg·K)]	Bei $\varphi=0,51$ und 30°C

Tab. 8-3 Berechnung der Konvektion auf der Maschinenoberseite (horizontale Fläche)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Wärmeübergangskoeffizient	α	2,769	[W/(m ² ·K)]	
Nusselt-Zahl	Nu	41,475	°C	
Vergleichsgröße	Raf_2	21138356,24		⁴⁷³
Hilfsgröße	f_2	0,403		⁴⁷⁴
Rayleigh-Zahl	Ra	52477600,97		
Grashof-Zahl	Gr	74239204,49		
Prandtl-Zahl	Pr	0,707		
Wärmeausdehnungskoeffizient	β	0,003	[1/K]	
spezifische Länge	$L_{fk o}$	0,398	[m]	⁴⁷⁵
Fläche Oberseite	A_O	2,55	[m ²]	
Wärmeleistung Konvektion Oberseite	$\dot{Q}_{K O}$	-61,9	[W]	

⁴⁷³ S. VDI e.V. 2013, S. 759.

⁴⁷⁴ S. Fußnote 473.

⁴⁷⁵ S. Böckh und Wetzel 2017, S. 152.

Tab. 8-4 Berechnung der Konvektion auf der Maschinenseitenflächen (vertikale Flächen)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Vorderseite				
Wärmeübergangskoeffizient	α	2,708	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	
Nusselt-Zahl	Nu	208,68	$[\text{°C}]$	
Hilfsgröße	f_1	0,346		⁴⁷⁶
Rayleigh-Zahl	Ra	5488074907,82		
Grashof-Zahl	Gr	-7763889884,80		
Prandl-Zahl	Pr	0,707		
Wärmeausdehnungskoeffizient	β	0,0033	$[1/\text{K}]$	
spezifische Länge	L_{fks}	2,05	$[\text{m}]$	⁴⁷⁷
Fläche Vorderseite	A_v	3,075	$[\text{m}^2]$	
Wärmeleistung Konvektion Vorderseite	\dot{Q}_{KV}	-57,4	$[\text{W}]$	
Rückseite				
Wärmeübergangskoeffizient	α	2,8055	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	
Nusselt-Zahl	Nu	216,17	$[\text{°C}]$	
Hilfsgröße	f_1	0,346		⁴⁷⁸
Rayleigh-Zahl	Ra	6138918036,00		
Grashof-Zahl	Gr	-8684627022,03		
Prandl-Zahl	Pr	0,707		
Wärmeausdehnungskoeffizient	β	0,0032	$[1/\text{K}]$	
spezifische Länge	L_{fks}	2,05	$[\text{m}]$	⁴⁷⁹
Fläche Rückseite	A_R	3,075	$[\text{m}^2]$	
Wärmeleistung Konvektion Rückseite	\dot{Q}_{KR}	-57,4	$[\text{W}]$	

⁴⁷⁶ S. Fußnote 473.⁴⁷⁷ S. Böckh und Wetzel 2017, S. 152⁴⁷⁸ S. Fußnote 473.⁴⁷⁹ S. Fußnote 477.

Tab. 8-5 Berechnung der Konvektion auf der Maschinenseitenflächen (vertikale Flächen)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
linke Seite				
Wärmeübergangskoeffizient	α	2,8178	[W/(m ² *K)]	
Nusselt-Zahl	Nu	217,11	[°C]	
Hilfsgröße	f_1	0,346		480
Rayleigh-Zahl	Ra	6224472297,12		
Grashof-Zahl	Gr	-8805659237,08		
Prandl-Zahl	Pr	0,707		
Wärmeausdehnungskoeffizient	β	0,0032	[1/K]	
spezifische Länge	L_{fks}	2,05	[m]	481
Fläche linke Seite	A_{ls}	3,485	[m ²]	
Wärmeleistung Konvektion linke Seite	\dot{Q}_{Kls}	-76,9	[W]	
rechte Seite				
Wärmeübergangskoeffizient	α	2,6435	[W/(m ² *K)]	
Nusselt-Zahl	Nu	203,68	[°C]	
Hilfsgröße	f_1	0,3464		482
Rayleigh-Zahl	Ra	5080334339,78		
Grashof-Zahl	Gr	-7187065966,58		
Prandl-Zahl	Pr	0,707		
Wärmeausdehnungskoeffizient	β	0,0033	[1/K]	
spezifische Länge	L_{fks}	2,05	[m]	483
Fläche rechte Seite	A_{rs}	3,485	[m ²]	
Wärmeleistung Konvektion rechte Seite	\dot{Q}_{Krs}	-58,6	[W]	

480 S. Fußnote 473.

481 S. Böckh und Wetzel 2017, S. 152

482 S. Fußnote 473.

483 S. Fußnote 481.

D.2.5 Wärmestrahlung

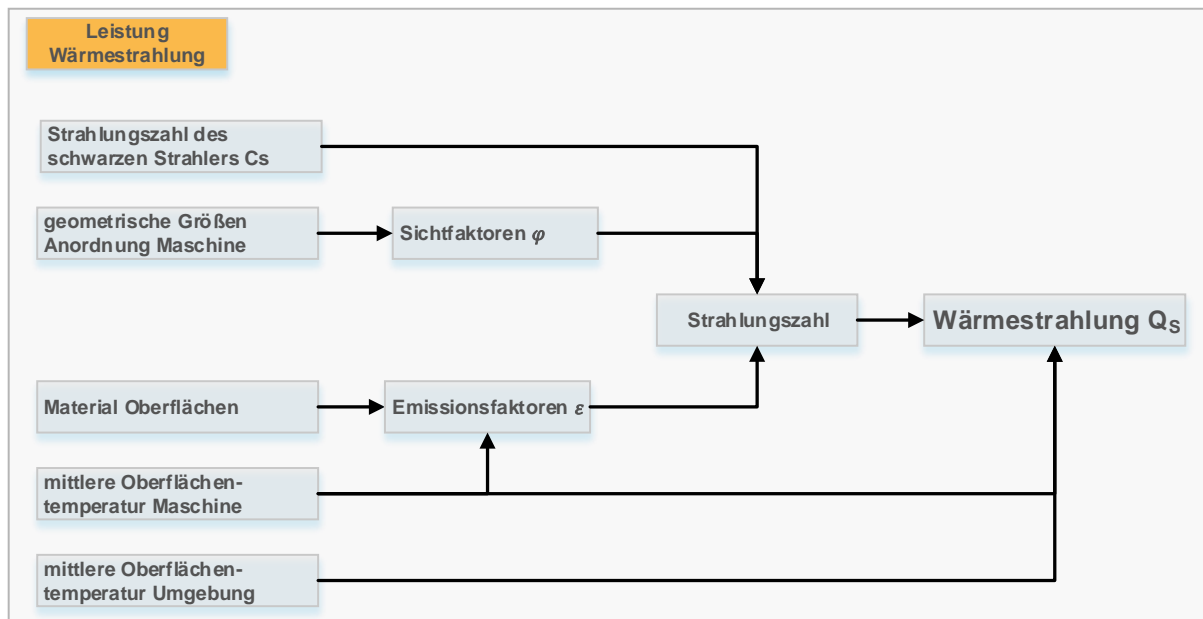


Abb. 8-5: Berechnungsschema zur Ermittlung der Wärmestrahlung⁴⁸⁴

D.2.6 Evaluierung des ERM: Wärmestrahlung

Tab. 8-6: Parameter zur Berechnung der Wärmestrahlung

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Temperatur RM Oberseite	$\vartheta_{RM O}$	36,2	[°C]	
Temperatur RM Vorderseite	$\vartheta_{RM V}$	34,3	[°C]	
Temperatur RM Rückseite	$\vartheta_{RM R}$	35,1	[°C]	
Temperatur RM linke Seite	$\vartheta_{RM LS}$	35,2	[°C]	
Temperatur RM rechte Seite	$\vartheta_{RM RS}$	33,8	[°C]	
Temperatur RM Unterseite	$\vartheta_{RM US}$	35,0	[°C]	
Temperatur Decke	ϑ_D	27,0	[°C]	Messung durch integrierte Temperatursensoren in Beton eingelassen
Temperatur Boden	ϑ_B	20,0	[°C]	Messung durch integrierte Temperatursensoren in Beton eingelassen
Temperatur "Wand" vorne	$\vartheta_{W v}$	25,0	[°C]	Messung durch integrierte Temperatursensoren in Beton eingelassen
Temperatur "Wand" hinten	$\vartheta_{W h}$	26,0	[°C]	Messung durch integrierte Temperatursensoren in Beton eingelassen
Temperatur Maschine links	$\vartheta_{S l}$	28,0	[°C]	Thermografiemessung
Temperatur Maschine rechts	$\vartheta_{S r}$	27,0	[°C]	Thermografiemessung

⁴⁸⁴ Eigene Darstellung.

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Emissionsgrad Maschinenlack	ε_{RM}	0,925		Lack ⁴⁸⁵
Emissionsgrad Fabrikwand	ε_W	0,94		Betonwand ⁴⁸⁶
Strahlungszahl	σ	5,67	[W/(m ² ·K ⁴)]	schwarzer Körper

Tab. 8-7: Sichtfaktoren Oberseite⁴⁸⁷

	RM O	D	W v	W h	W l	W r	$\sum \varphi_i$
RM O	0	0,629	0,015	0,191	0,130	0,009	0,973
D	0,003	0	0,138	0,138	0,089	0,089	0,457
W v	0,000	0,350	0	0,120	0,096	0,096	0,662
W h	0,002	0,350	0,120	0	0,096	0,096	0,664
W l	0,003	0,365	0,155	0,144	0	0,050	0,717
W r	0,0002	0,365	0,144	0,144	0,050	0	0,703

Tab. 8-8: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die Oberseite

Fläche	Symbol	Wert [m ²]
RM O	$A_{RM O}$	2,55
D	A_D	525,10
W v	$A_{W v}$	207,19
W h	$A_{W h}$	207,19
W l	$A_{W l}$	128,12
W r	$A_{W r}$	128,12

Tab. 8-9: Sichtfaktoren Vorderseite⁴⁸⁸

	RM V	W v	B	D	S l	S r	$\sum \varphi_i$
RM V	0	0,002	0,434	0,448	0,109	0,007	1
W v	0,001	0	0,280	0,280	0,090	0,090	0,741
B	0,000	0,220	0	0,438	0,090	0,090	0,838
D	0,001	0,220	0,438	0	0,090	0,090	0,839
S l	0,000	0,210	0,270	0,270	0	0,040	0,79
S r	0,000	0,210	0,270	0,270	0,040	0	0,79

⁴⁸⁵ S. VDI e.V. 2013, S. 1087.⁴⁸⁶ S. VDI e.V. 2013, S. 1088.⁴⁸⁷ S. Howell 2001.⁴⁸⁸ S. Fußnote 487.

Tab. 8-10: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die Vorderseite

Fläche	Symbol	Wert [m ²]
RM V	$A_{RM V}$	3,075
D	A_D	266,92
W v	$A_{W v}$	350,26
W h	$A_{W h}$	350,26
W l	$A_{W l}$	110,10
W r	$A_{W r}$	110,10

Tab. 8-11: Sichtfaktoren Rückseite⁴⁸⁹

	RM R	W h	B	D	S l	S r	$\sum \varphi_i$
RM R	0	0,200	0,200	0,003	0,299	0,299	1
W h	0,200	0	0,200	0,476	0,062	0,062	1
B	0,300	0,300	0	0,005	0,197	0,197	1

Tab. 8-12: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die Rückseite

Fläche	Symbol	Wert [m ²]
RM R	$A_{RM R}$	2,7
W h	$A_{W h}$	2,7
B	A_B	1,8

Tab. 8-13: Sichtfaktoren linke Seite⁴⁹⁰

	RM LS	W r	B	D	S l	S r	$\sum \varphi_i$
RM LS	0	0,251	0,190	0,076	0,018	0,315	0,849
W r	0,007	0	0,13	0,13	0,212	0,212	0,691
B	0,004	0,248	0	0,088	0,208	0,208	0,756

Tab. 8-14: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die linke Seite

Fläche	Symbol	Wert [m ²]
RM R	$A_{RM R}$	3,485
W l	$A_{W h}$	125,68
B	A_B	178,32

⁴⁸⁹ S. Fußnote 487. Aufgrund des geringen Abstands zwischen der Maschinenrückseite und Wandfläche ergeben sich die weiteren Sichtfaktoren zu rund 0.

⁴⁹⁰ S. Fußnote 487. Aufgrund des geringen Abstands zwischen der Maschinenrückseite und Wandfläche ergeben sich die weiteren Sichtfaktoren zu rund 0.

Tab. 8-15: Sichtfaktoren rechte Seite⁴⁹¹

	RM RS	M r	B	D	S I	S r	$\sum \varphi_i$
RM RS	0	0,357	0,123	0,13	0,212	0,212	1
M r	0,472	0	0,13	0,13	0,212	0,212	1
B	0,255	0,248	0	0,088	0,208	0,208	1

Tab. 8-16: Flächeninhalte der im Strahlungsaustausch befindlichen Oberflächen bezogen auf die rechte Seite

Fläche	Symbol	Wert [m²]
RM R	$A_{RM R}$	3,485
M h	$A_{W h}$	2,64
B	A_B	1,681

⁴⁹¹ S. Fußnote 487. Aufgrund des geringen Abstands zwischen der Maschinenrückseite und Wandfläche ergeben sich die weiteren Sichtfaktoren zu rund 0.

D.3 Messstellenplan zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen

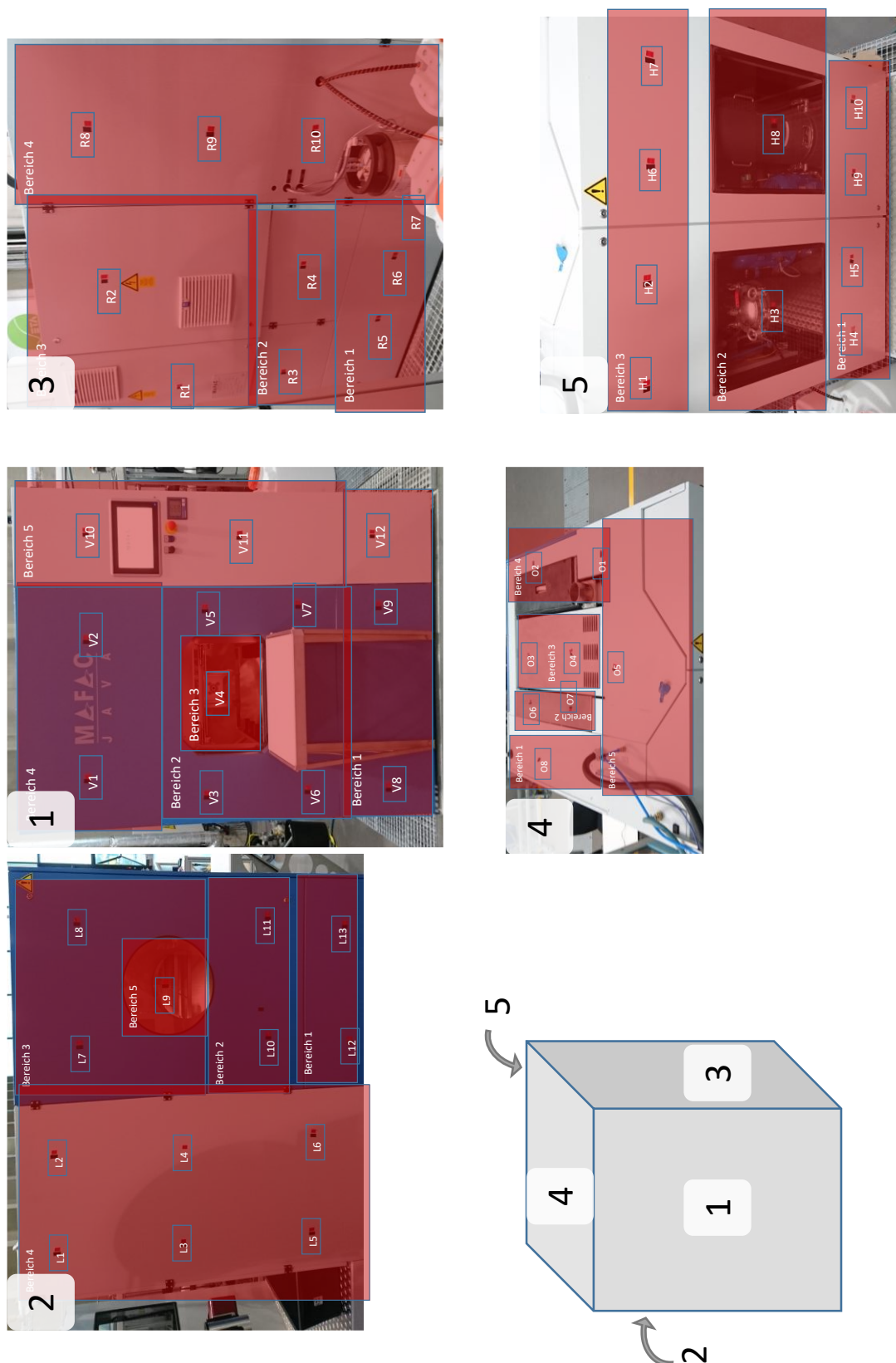


Abb. 8-6: Messstellenplan zur Kalibrierung der Thermografietemperaturmessungen⁴⁹²

⁴⁹² Eigene Darstellung.

D.4 Berechnungsschemata zur Ermittlung der Enthalpien der Luftströme

D.4.1 Feuchte Luft

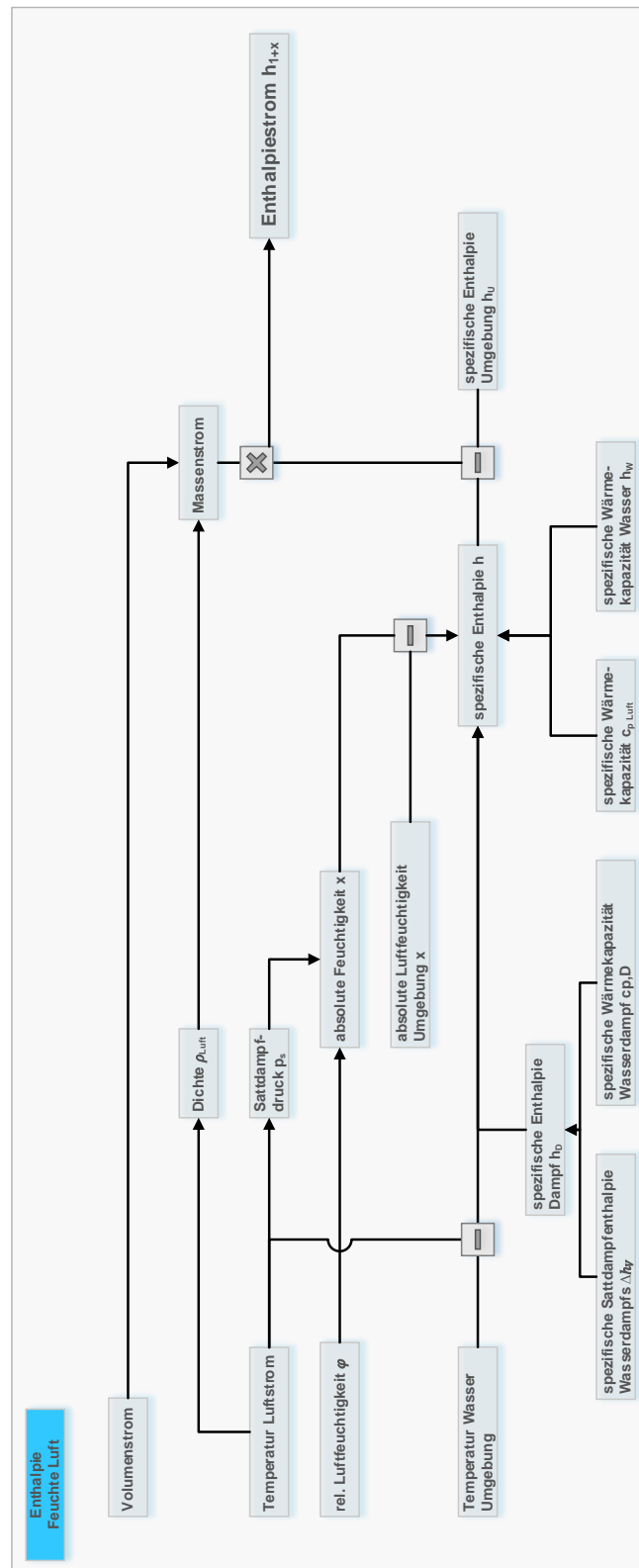


Abb. 8-7: Berechnungsschema zur Ermittlung der Enthalpie feuchter Luft⁴⁹³

⁴⁹³ Eigene Darstellung.

D.4.2 Evaluierung des ERM: Enthalpieströme

Tab. 8-17: Parameter zur Enthalpiestromberechnung

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Druck Druckluft	p_{DL}	701325	[Pa]	
Umgebungstemperatur	T_U	27,4	[°C]	
Temperatur Abluft	T_{AL}	40	[°C]	
Temperatur Maschineninnenraum	T_{MR}	40	[°C]	
Temperatur Druckluft nach Vorerwärmung	T_{DLW}	40	[°C]	
Volumenstrom Druckluft (alternierend)	$\dot{V}_{DL alt}$	0,036	[m³/s]	
Volumenstrom Druckluft	\dot{V}_{DL}	0,028	[m³/s]	
Volumenstrom Abluft	\dot{V}_{AL}	-0,135	[m³/s]	
Volumenstrom Zuluft	\dot{V}_{ZL}	0,197	[m³/s]	
relative Luftfeuchtigkeit Druckluft	φ_{DL}	0,05		
relative Luftfeuchtigkeit Abluft	φ_{AL}	0,5		
relative Luftfeuchtigkeit Zuluft	φ_{ZL}	0,51		
abs. Luftfeuchtigkeit Maschineninnenraum / abs. Luftfeuchtigkeit U		120	%	
spezifische Wärmekapazität	$c_{p Luft}$	1005	[J/(kg*K)]	Luft
Gaskonstante Luft	R_G	287,1	[Nm/kgK]	
Gaskonstante Dampf	R_D	461,5	[Nm/kgK]	
Sättigungsdampfdruck (T = 0°C)	$E (0^\circ C)$	610,78	[Pa]	
spezifische Enthalpie Umgebungsluft	$h_{ZL bez}$	57257,86	[J/kg]	

Tab. 8-18: Berechnung der Enthalpieströme Druckluft, Impulsblasen alternierend

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Druckluft Impulsblasen alternierend				
Enthalpiestrom Druckluft	\dot{H}_{DL}	-8844,86	[W]	
Absolute Feuchte Druckluft	x_{DL}	0,00016		
spezifische Enthalpie Druckluft	h_{DL}	-29397,01	[J/kg]	(bezogen auf UL)
Dichte Druckluft	ρ_{DL}	8,281	[kg/m³]	(7,01325 bar x= 0,05; 22° C)
Sattdampfdruck Druckluft	$p_{S DL}$	3655,39	[Pa]	

Tab. 8-19: Berechnung der Enthalpieströme Druckluft

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Druckluft				
Enthalpiestrom Druckluft	\dot{H}_{DL}	-6852,74	[W]	
Absolute Feuchte Druckluft	x_{DL}	0,00016		
spezifische Enthalpie Druckluft	h_{DL}	-29397,01	[J/kg]	(bezogen auf UL)
Dichte Druckluft	ρ_{DL}	8,281	[kg/m³]	(7,01325 bar x= 0,05; 22° C)
Sattdampfdruck Druckluft	$p_{S DL}$	3655,39	[Pa]	

Tab. 8-20: Berechnung der Enthalpieströme Abluft

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Abluft				
Enthalpiestrom Abluft	\dot{H}_{AL}	-6435,06	[W]	
Absolute Feuchte Abluft	x_{AL}	0,02352		
spezifische Enthalpie Abluft	h_{AL}	42866,10	[J/kg]	(bezogen auf UL)
Dichte Abluft	ρ_{AL}	1,112	[kg/m³]	(1,01325 bar x= 0,50; 40°C)
Sattdampfdruck Abluft	$p_{S AL}$	7381,26	[Pa]	

Tab. 8-21: Berechnung der Enthalpieströme Abluft (am Ausgang Reinigungskammer)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Abluft (am Ausgang Reinigungskammer)				
Enthalpiestrom Abluft	\dot{H}_{AL}	-8829,15	[W]	
Absolute Feuchte Abluft	x_{AL}	0,02899		
spezifische Enthalpie Abluft	h_{AL}	58813,95	[J/kg]	(bezogen auf UL)
Dichte Abluft	ρ_{AL}	1,097	[kg/m³]	(1,01325 bar x= 0,50; 40°C)
Sattdampfdruck Abluft	$p_{S AL}$	8203,77	[Pa]	

Tab. 8-22: Berechnung der Enthalpieströme Zuluft

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Zuluft				
Enthalpiestrom Zuluft	\dot{H}_{ZL}	0	[W]	
Absolute Feuchte Zuluft	x_{ZL}	0,01166		
spezifische Enthalpie Zuluft	h_{ZL}	0	[J/kg]	(bezogen auf UL)
Dichte Zuluft	ρ_{ZL}	1,191	[kg/m³]	(7,01325 bar x= 0,05; 22° C)
Sattdampfdruck Zuluft	$p_{S ZL}$	3655,39	[Pa]	

Tab. 8-23: Berechnung der Enthalpieströme Zuluft (nach Heizregister)

Parameter	Symbol	Wert	Einheit	Bemerkung
Zuluft (nach Heizregister)				
Enthalpiestrom Zuluft	\dot{H}_{ZL}	17462,53	[W]	
Absolute Feuchte Zuluft	x_{ZL}	0,01166		
spezifische Enthalpie Zuluft	h_{ZL}	74464,58	[J/kg]	(bezogen auf UL)
Dichte Zuluft	ρ_{ZL}	1,191	[kg/m³]	(7,01325 bar x= 0,05; 22° C)
Sattdampfdruck Zuluft	$p_{S ZL}$	3655,39	[Pa]	

D.5 Partikelauswertung

Tab. 8-24: Auswertung der Formanalyse und Feinstruktur der entfernten Partikel aus den Versuchsreihen

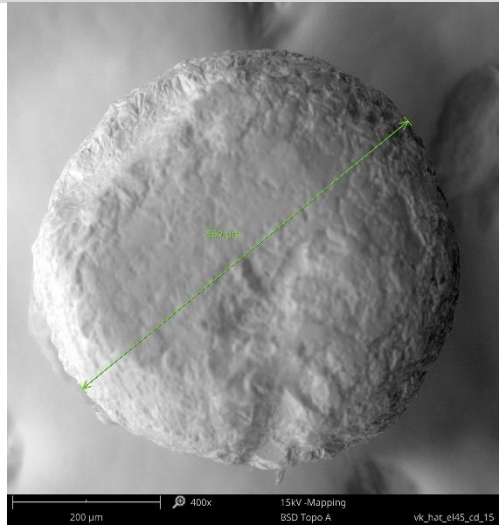
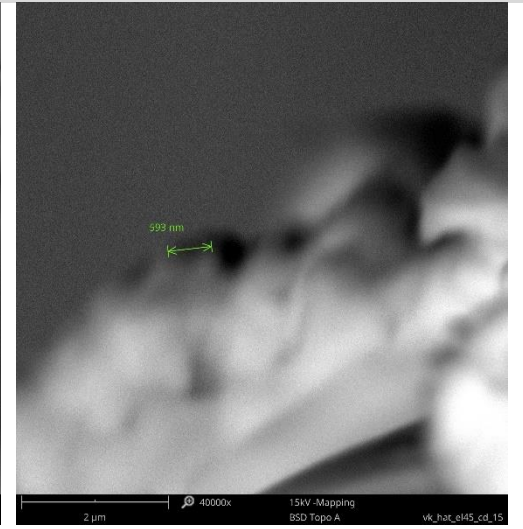

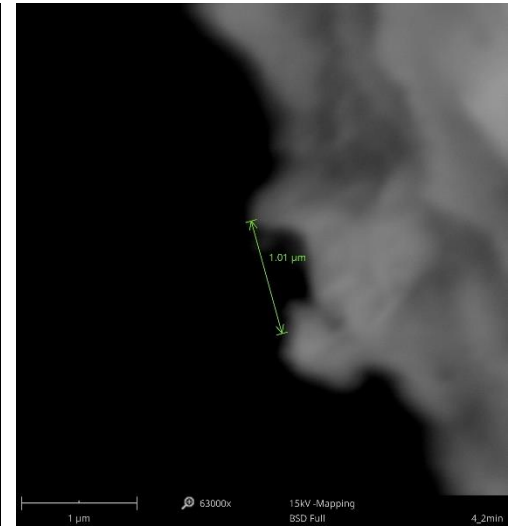
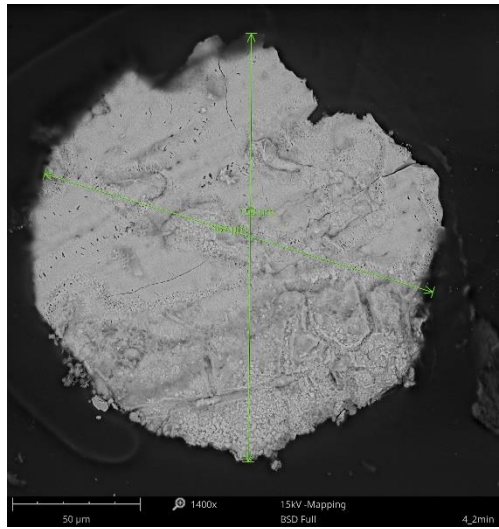
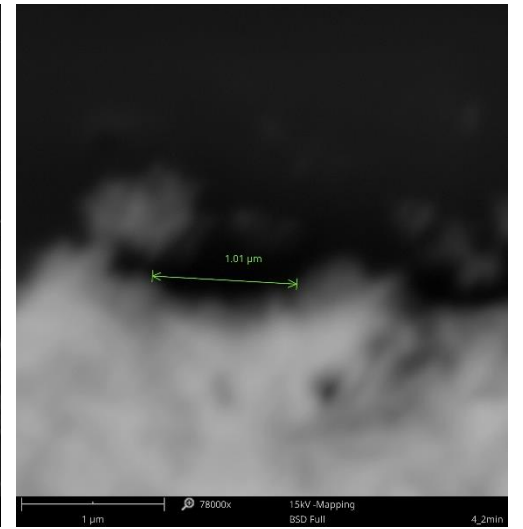
Nr	Code	Feret max ($\cdot 10^{-6}$) [m]	Grobstruktur / Form ⁴⁹⁴					Feinstruktur / Rauheit ⁴⁹⁵		
			Radius ($\cdot 10^{-6}$) [m]	Anzahl Radien	Tangentenlänge ($\cdot 10^{-6}$) [m]	rms_1 ($\cdot 10^{-6}$) [m]	Sphäri- zität	Asperitenradius ($\cdot 10^{-6}$) [m]	Asperiten- abstand ($\cdot 10^{-6}$) [m]	rms_2 ($\cdot 10^{-9}$) [m]
1	I	569	217,75	8	228,90	4,14	1,00	0,33	1,56	1,19
2	I	518	22,67	23	28,57	0,62	0,36	0,35	0,77	2,79
3	I	465	24,67	23	44,97	1,41	0,44	0,36	16,09	0,13
4	I	431	39,84	18	56,90	1,40	0,58	0,57	1,33	4,20
5	I	421	22,29	24	40,63	1,27	0,53	0,27	2,32	0,52
6	H	374	11,47	14	58,56	5,14	0,41	1,07	1,01	19,40
7	H	359	44,70	29	36,43	0,51	0,85	0,61	1,15	5,63
8	H	352	36,88	28	38,09	0,68	0,88	0,31	0,27	6,03
9	H	345	23,26	28	32,62	0,79	0,75	0,05	1,49	0,02
10	H	340	5,55	8	96,56	28,92	0,34	0,62	0,92	7,31
11	H	323	15,36	10	78,47	6,89	0,48	0,29	1,12	1,28
12	H	300	25,42	20	44,54	1,34	0,77	0,39	0,42	6,29
13	H	284	20,91	18	41,34	1,41	0,67	0,69	0,61	13,41
14	H	256	32,73	18	47,59	1,19	0,89	0,55	1,36	3,81
15	H	254	15,91	17	38,21	1,58	0,78	0,26	1,61	0,70
16	H	247	22,66	23	30,39	0,70	0,83	0,17	1,16	0,43
17	H	247	10,25	12	48,25	3,91	0,44	0,35	0,77	2,79
18	H	213	17,66	26	22,89	0,51	0,75	0,98	0,47	34,92
19	H	204	16,32	24	26,74	0,75	0,87	0,33	2,93	0,65
21	H	200	16,68	13	42,25	1,84	0,72	0,23	0,55	1,66
22	H	200	11,85	16	32,88	1,57	0,66	0,43	1,68	1,92
23	G	186	21,97	18	27,34	0,59	0,74	1,78	1,19	46,04
24	G	179	6,75	13	29,20	2,17	0,39	0,28	1,00	1,37
25	G	167	23,98	19	27,35	0,54	0,94	0,15	1,09	0,36
26	G	166	20,93	23	21,64	0,38	0,87	0,53	3,08	1,58
27	G	152	24,14	19	23,50	0,39	0,86	1,21	6,43	3,88
28	F	138	6,01	17	20,63	1,22	0,65	0,62	1,50	4,37
29	F	125	4,65	12	26,59	2,62	0,54	0,12	0,70	0,34
30	F	125	15,12	20	15,66	0,28	0,73	0,34	1,65	1,21
31	F	124	12,18	12	25,90	0,95	0,68	0,54	9,39	0,53
32	F	121	2,24	8	30,58	7,17	0,31	0,14	7,95	0,04
33	F	116	11,35	29	11,50	0,20	0,84	0,23	0,79	1,19
34	F	116	11,02	28	12,00	0,22	0,85	0,34	0,49	4,13
35	F	103	5,38	18	16,33	0,85	0,80	0,29	1,43	1,01
36	D	41	3,84	26	4,69	0,10	0,86	0,17	0,89	0,59
37	D	41	3,59	30	4,15	0,08	0,88	0,30	0,60	2,59

In der Tab. 8-25 sind für jeweils für eine Partikelgrößenklasse Beispiele der Rasterelektronen-mikroskopieaufnahmen gezeigt, die für die Grob- und Feinstrukturanalyse erstellt wurden.

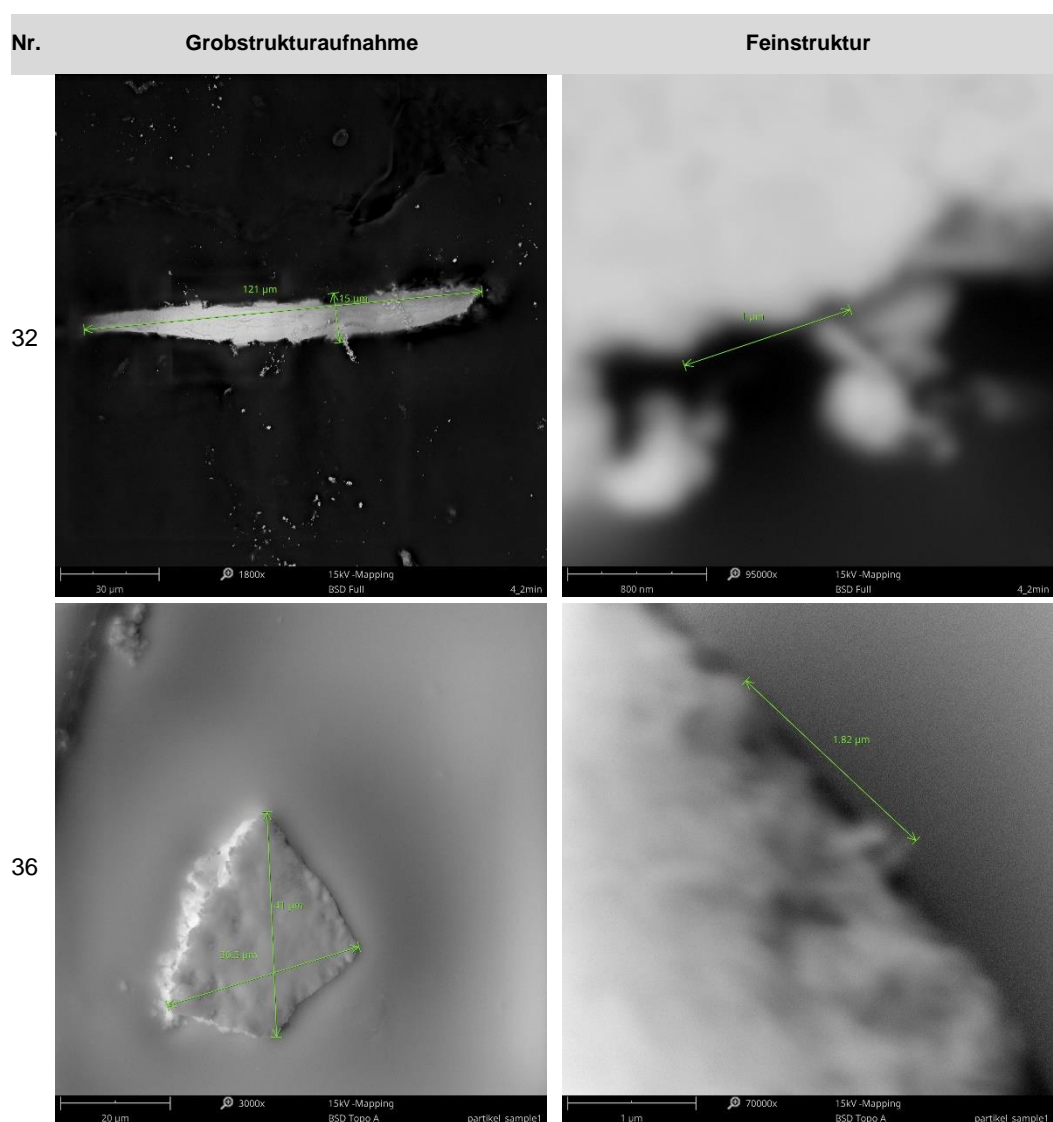
⁴⁹⁴ Radien und Tangentenlänge entsprechen den Mittelwerten für das jeweilige Partikel. rms_1 wurde berechnet nach Gleichung (4-12) und die Sphärizität nach (4-22).

⁴⁹⁵ Asperitenradien und Abstände entsprechen den Mittelwerten für das jeweilige Partikel. rms_2 wurde berechnet nach Gleichung (4-12).

Tab. 8-25: Aufnahmen der Partikelgrob- und -feinstruktur mit einem Rasterelektronenmikroskopie

Nr.	Grobstrukturaufnahme	Feinstruktur
1	 <p>SEM image of a spherical particle. A green double-headed arrow indicates a diameter of 350 µm. The image shows a textured surface. Metadata at the bottom: 200 µm scale bar, 400x magnification, 15kV -Mapping, BSD Topo A, vk_hat_el45_cd_15.</p>	 <p>High-magnification SEM image of the particle surface. A green double-headed arrow indicates a feature size of 593 nm. Metadata at the bottom: 2 µm scale bar, 40000x magnification, 15kV -Mapping, BSD Topo A, vk_hat_el45_cd_15.</p>
15	 <p>SEM image of a fractured particle. Green double-headed arrows indicate dimensions of 350 µm and 15 µm. The image shows a network of cracks. Metadata at the bottom: 100 µm scale bar, 800x magnification, 15kV -Mapping, BSD Full, 4_2min.</p>	 <p>High-magnification SEM image of the fractured surface. A green double-headed arrow indicates a feature size of 1.01 µm. Metadata at the bottom: 1 µm scale bar, 63000x magnification, 15kV -Mapping, BSD Full, 4_2min.</p>
25	 <p>SEM image of a fractured particle. Green double-headed arrows indicate dimensions of 350 µm and 15 µm. The image shows a network of cracks. Metadata at the bottom: 50 µm scale bar, 1400x magnification, 15kV -Mapping, BSD Full, 4_2min.</p>	 <p>High-magnification SEM image of the fractured surface. A green double-headed arrow indicates a feature size of 1.01 µm. Metadata at the bottom: 1 µm scale bar, 78000x magnification, 15kV -Mapping, BSD Full, 4_2min.</p>

Tab. 8-26: Fortsetzung von Tab. 8-25



D.6 Analyse der filmischen Verunreinigung

Die filmischen Verunreinigung wurde nach folgender Methode extrahiert und Analyse:⁴⁹⁶

- Steuerscheiben ins Becherglas eingelegt und mit Heptan aufgefüllt
- Steuerscheiben jeweils von jeder Seite 5 Minuten im Ultraschallbad gelagert (d.h. max. 10 Minuten im Ultraschallbad)
- Metallscheiben wurden entnommen und nochmals mit Heptan abgespritzt, um Kontamination der Steuerscheiben mit Restschmutz zu vermeiden
- Gesamtes Volumen Lösemittels: 400 ml
 - ⇒ Trübe, feiner Abrieb
- Filtrieren des Lösemittels über Blaubandfilter:
 - m (Filter, Leer) = 215,02 mg
 - m (Filter, RS) = 226,06 mg
 - m (Rückstand) = **11,04 mg** (Feststoffanteil auf 3 Scheiben)
- Filterkuchen: Feiner, dunkler Staub, einige größere Metallspäne
- Filterkuchen wurde mit Heptan auf der Apparaturinhalt gewaschen
- Apparaturinhalt quantitativ in 1000 ml Rundkolben überführt.
- Abdestillieren des Heptans bei 50 °C und 80 mbar am Rotationsverdampfer (ca. 10 Minuten)
 - ⇒ Öliges, flüssiger Rückstand
- Quantitatives überführen in bilanzierten 50 ml Spitzrundkolben.
 - ⇒ Erneutes Abdestillieren
 - m (Kolben, leer) = 30183,30 mg
 - m (Kolben, mit RS) = 30225,52 mg
 - m (Rückstand) = **42,22 mg** (flüssiger, unpolarer Anteil auf 3 Scheiben)

Resultat IR- Spektroskopie:
Mineralölbasis und Esteröl



Abb. 8-8: Analysierte Bauteile⁴⁹⁷

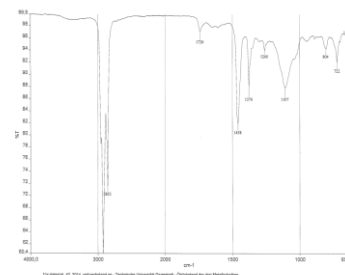
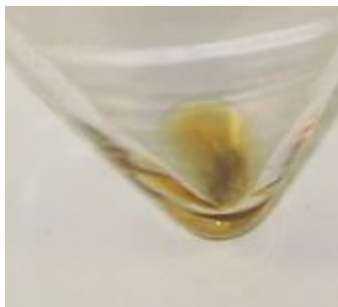


Abb. 8-9: Chemischer Rückstand und IR-Spektroskopieanalyse⁴⁹⁸

⁴⁹⁶ Analyse durchgeführt und ausgewertet in den Laboren der Oemeta Chemische Werke GmbH.

⁴⁹⁷ Bildquelle: Oemeta Chemische Werke GmbH. Erlaubnis zur Verwendung in dieser Arbeit wurde erteilt.

⁴⁹⁸ S. Fußnote 332.

D.7 Pumpenkennfeld

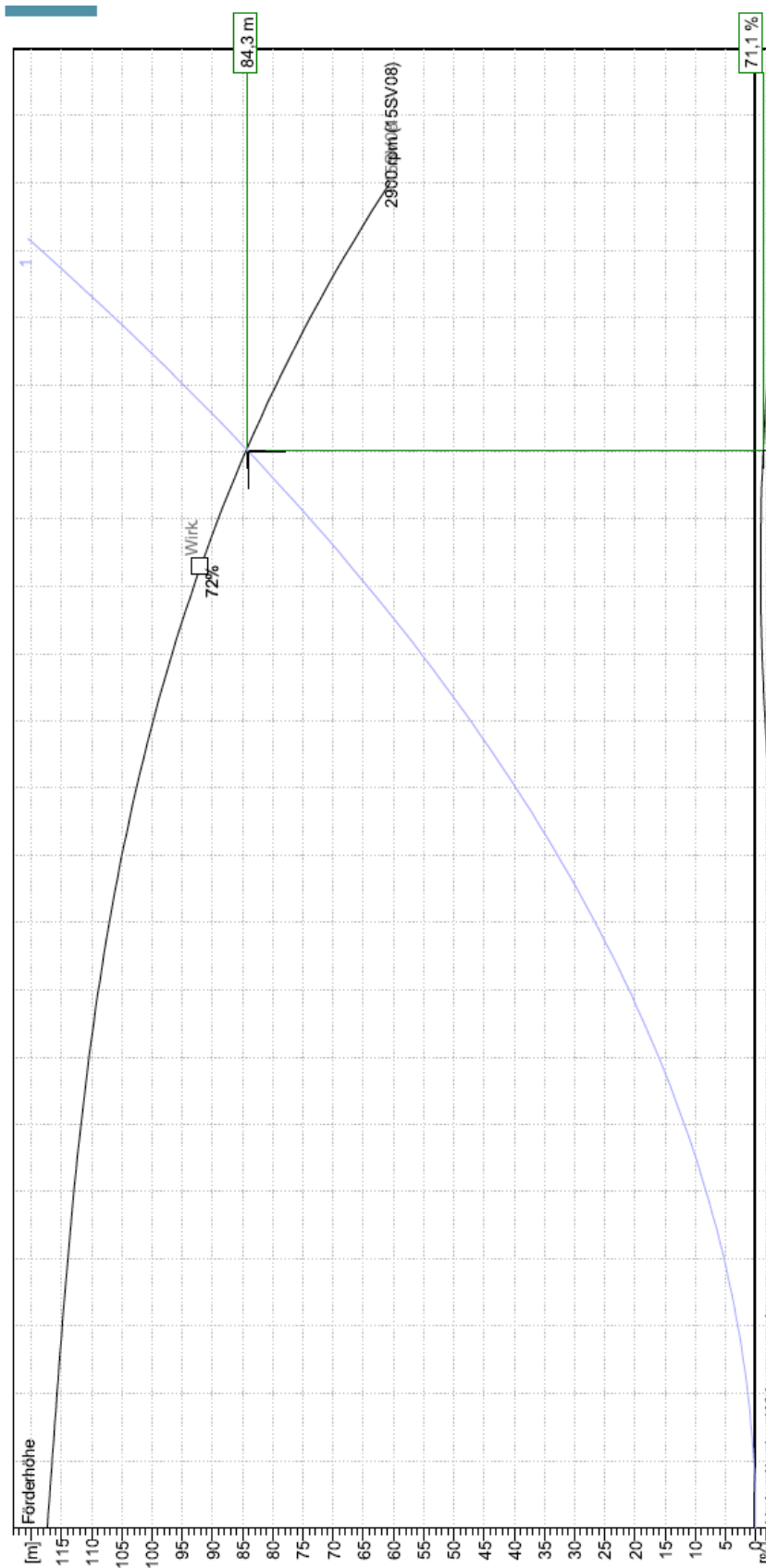


Abb. 8-10: Kennfeld Lowara 15SV08F075T; eingezeichneter Betriebspunkt nach Druckmessung

D.8 Systemidentifikationstool in der KNIME Analytics Platform

Das generische Systemidentifikationstool ist mit der „Knime Analytics Platform“ aufgebaut worden. Das Tool ist in verschiedenen, vorgegebenen Knoten aufgebaut, die unterschiedliche Funktionen durchführen. Mehrere Knoten können zu so genannten „Meta-Knoten“ zusammengefasst werden.

Das Grundgerüst für das generische Systemidentifikationstool in Knime bildet der Cross Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM). In diesem wird der Prozess des Data Minings in sechs Phasen (1. Business Understanding, 2. Data Understanding, 3. Data Preparation, 4. Model Training 5. Evaluation, 6. Model Application) unterteilt.

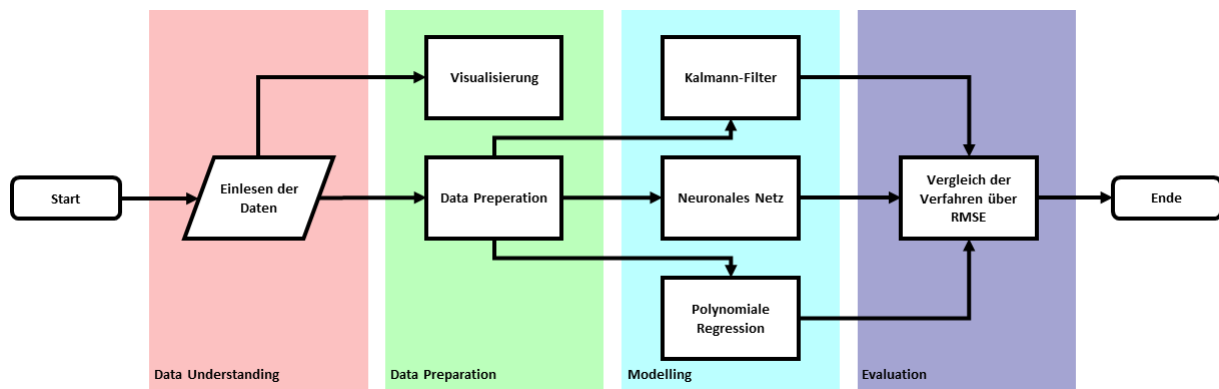


Abb. 8-11: Übersicht des Systemidentifikationstools auf Basis des CRISP-DM

Für das Systemidentifikationstool werden die Phasen zwei bis fünf durchlaufen. Vor dem Start des Tools werden bestimmte Parameter über globale Flussvariablen festgelegt, auf die das Tool während dem Ablauf zugreift. Die einzutragenden Variablen für die Polynomiale Regression sind der höchste und niedrigste Polynomiale-Grad sowie die Schrittweise für die Erhöhung des Grades mit jedem Schleifendurchlauf. Für das neuronale Netz sind für die Hidden-Layer und die Neuronen ebenfalls die niedrigsten und höchsten Werte sowie die Schrittweise festzulegen. Des Weiteren ist der Dateiname inklusive Dateipfad für die Exceltabelle, in der die Ergebnisse abgespeichert werden als globale Flussvariable einzutragen.

Abb. 8-11 zeigt die Übersicht des generischen Systemidentifikationstool auf Basis des CRISP-DM. In der ersten Phase dem Data Understanding werden die Daten von einer ausgewählten Excelliste eingelesen, wobei Inputs mit dem Präfix „in_“ und Outputs mit „out_“ gekennzeichnet sein müssen, um so die generische Funktionsweise des Tools zu ermöglichen.

Die Datenvorverarbeitung findet in der zweiten Phase, der Data Preparation, statt. Im Metanode „Data Preparation“ werden die Daten zunächst nach Inputs und Outputs getrennt, bevor im weiteren Durchlauf „NaNs“ und „Infs“ gelöscht werden. Anschließend werden die Daten normalisiert (0 bis 1) und per Random-Sampling in Trainings-, Test- und Validierungsdaten unterteilt. Der Metanode „Visualisierung“ ermöglicht es die Daten in einer grafischen Darstellung zu betrachten, um so mögliche Fehlerdaten zu identifizieren.

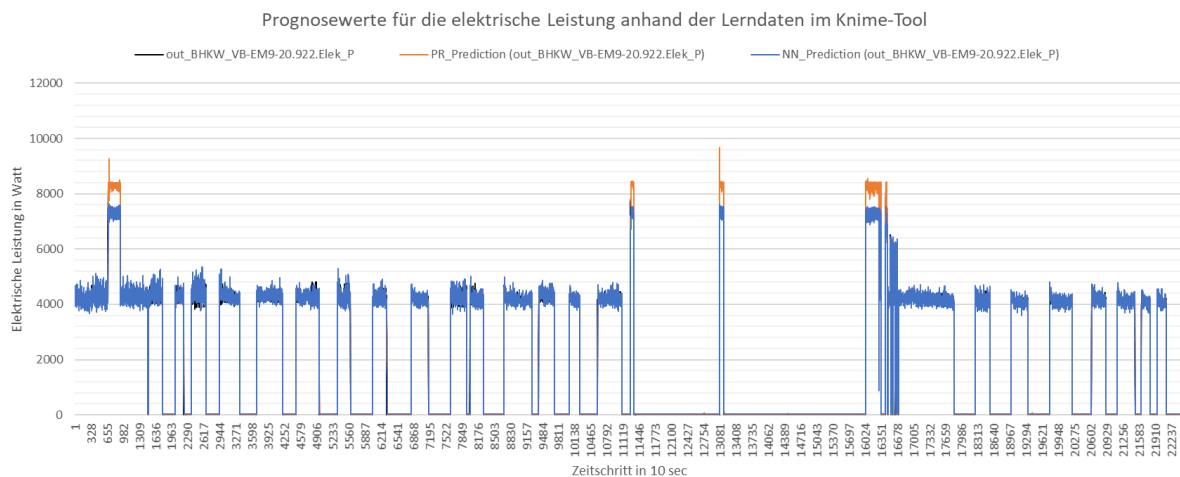


Abb. 8-12: Prognosewerte für die elektrische Leistung anhand der Lerndaten im Knime-Tool, eigene Darstellung 2018

In der Phase des „Modellings“ werden die ausgewählten Modelle (Polynomiale Regression, neuronales Netz, Kalman Filter) in den gleichnamigen Meta-Knoten durchlaufen. In einem ersten Schritt werden die Modelle mit den über die globalen Flussvariablen festgelegten Parametern und den Trainingsdaten angelernet und anhand der Testdaten wird eine Prognose getroffen. Dabei lernt das Systemidentifikationstool automatisch das Modell für jeden gekennzeichneten Output an. Anhand der Prognosedaten wird die Prognosegüte über den Root Mean Squared Error (RMSE) aus Prognosedaten und Realdaten bestimmt. Die Parameterkombination, die den geringsten RMSE aufweist wird für den weiteren Prozess ausgewählt. Im Meta-Knoten „Cross Validation“ werden die ausgewählten Prognosedaten zum erneuten Anlernen des jeweiligen Modells mit der zuvor ausgewählten Parameterkombination herangezogen. Mittels der Validierungsdaten werden ebenfalls Prognosedaten erstellt, anhand derer erneut die Prognosegüte über den RMSE bestimmt wird. Abb. 8-12 zeigt die anhand der Lerndaten erzeugten Prognosedaten nach der Cross-Validation. Die Prognosedaten aus dem „Cross-Validation“-Knoten werden im Meta-Knoten „Denormalisierer“ denormalisiert.

Im letzten Schritt des CRISP-DM der „Evaluation“ werden Ergebnisdaten zum Vergleich zusammengetragen.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Felix Junge
Geburtsdatum	30. Januar 1984
Geburtsort	Wolgast
Staatsangehörigkeit	Deutsch

Berufserfahrung

02/2013 – 07/2018	Technische Universität Darmstadt Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) – Prof. Abele Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Forschungsgruppe Umweltgerechte Produktion
10/2010 – 06/2012	Universität Rostock Lehrstuhl für Strömungsmaschinen – Prof. Wurm Wissenschaftliche Hilfskraft
09/2009 – 02/2010	BMW AG Werk Regensburg Praktikum Karosseriebau Anbauteile/Finish

Ausbildung

10/2006 – 10/2012	Universität Rostock Allgemeiner Maschinenbau – Abschluss: Dipl.-Ing.
10/2004 – 09/2006	Leibniz Universität Hannover Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau/VWL
07/2003 – 03/2004	Bundeswehr, Grundwehrdienst
08/1990 - 06/2003	Gymnasium Wolgast – Allgemeine Hochschulreife Grundschule Zinnowitz